

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí

Návrh sanace krovu kostela

Design of church roof-truss reconstruction

Student:

Bc. Ondřej Cigánek

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Antonín Lokaj. Ph.D

Ostrava 2012

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že VŠB – TUO má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3 zákona č. 121/2000 Sb.)
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovu práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., O vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

ANOTACE

Cigánek, O. Návrh sanace krovu kostela, Ostrava, Vysoká škola báňská – Technická univerzita, Katedra konstrukcí, 2012, diplomová práce, vedoucí: doc. Ing. Antonín Lokaj. Ph.D, 76 stran

Diplomová práce obsahuje určení zatížení na konstrukce krovů kostela, přepočet posouzení únosnosti vybraných prvků na zatížení novou krytinou, návrh postupu sanace vybraných poškozených prvků a posouzení jejich únosnost. Práce také obsahuje porovnání vnitřních sil získaných z výpočetního modelu nepoškozené a poškozené konstrukce.

ANNOTATION

Cigánek, O. Design of church roof-truss reconstruction, Ostrava, VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Building Construction, dissertation thesis, dissertation supervisor: doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph. D. 76 pages.

This dissertation thesis contains: determination of load on rafters' construction of a church and recalculation and evaluation of reaction of selected components on an additional load of new roof covering. It also covers the exact procedure of rehabilitation of selected damaged components and evaluation of their load capacity. Moreover, this thesis includes comparison of internal forces recovered from arithmetical model of both intact and damaged constructions.

Obsah

1.	ÚVOD.....	1
2.	Umístění řešené konstrukce.....	2
3.	Historie	3
3.1	Historie kostela sv. Jana Křtitele v Hlučíně.....	3
4.	Popis konstrukce krovu kostela	4
4.1	Hlavní loď.....	5
4.2	Kaple andělů	5
4.3	Presbytář	5
5.	Zhodnocení stavu poškození krovu kostela.....	6
5.1	Hlavní loď.....	6
5.2	Kaple andělů	6
5.3	Presbytář	7
6.	Druhy poškození vyskytující se na krovu kostela.	9
6.1	Dřevokazné houby	9
6.2	Dřevokazný hmyz	10
7.	Metody sanace dřevěných konstrukcí	11
7.1	Používané sanační metody.....	11
7.2	Sanační metody použité v této práci	14
8.	Tvorba výpočetních modelů	15
9.	Materiál krovu	18
10.	Zatížení	19
10.1	Zatížení stálé	19
10.2	Užitná zatížení.....	20
10.3	Zatížení sněhem.....	21
10.4	Zatížení větrem.....	23

11.	Posouzení vybraných prvků krovu – Mezní stav únosnosti	31
11.1	Podrobné posouzení únosnosti krokve hlavní lodě	32
11.2	Výsledky posouzení únosnosti dalších vybraných prvků	45
12.	Návrh postupu sanace vybraných prvků krovu	47
12.1	Vazný trám hlavní lodi	47
12.2	Krokve hlavní lodi	50
12.3	Krokev Kaple andělů	51
12.4	Vaznice u zdi kostela v Kapli andělů	52
12.5	Vazný trám pod věží presbytáře	52
12.6	Vazný trám kříže pod věží presbytáře	54
13.	Posouzení únosnosti vybraných spojů nosných prvků	55
13.1	Svorníkové spoje	55
13.2	Tesařské spoje	68
14.	Model poškozené konstrukce	73
15.	Závěr	75
16.	Seznam norem	76
17.	Seznam literatury	76
18.	Prezentace k přednáškám	76
19.	Internetové zdroje	76

Seznam použitého značení

A	Plocha
b	Šířka
b_{ef}	Efektivní šířka
C_e	Součinitel expozice
c_f	Součinitel síly
C_t	Tepelný součinitel
C_{dir}	Součinitel směru větru
C_r	Součinitel drsnosti
C_{season}	Součinitel ročního období
$C_{0(z)}$	Součinitel ortografie
$f_{c,k,0}$	Charakteristická pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny
$f_{t,k,0}$	Charakteristická pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny
$f_{c,k,90}$	Charakteristická pevnost v tlaku kolmo k vláknům
$f_{h,0,k}$	Charakteristická pevnost v otláčení rovnoběžně s vlákny
$f_{h,90,k}$	Charakteristická pevnost v otláčení kolmo k vláknům
$f_{h,\alpha k}$	Charakteristická pevnost v otláčení pod uhem α k vláknům
$f_{m,k}$	Charakteristická pevnost v ohybu
$f_{u,k}$	Charakteristická pevnost svorníku
f_{vk}	Charakteristická pevnost ve smyku
$F_{v,Rd}$	Návrhová únosnost svorníků
$f_{c,d,0}$	Návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny
$f_{t,d,0}$	Návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny
$f_{c,d,90}$	Návrhová pevnost v tlaku kolmo k vláknům
$f_{m,d}$	Návrhová pevnost v ohybu
$f_{v,d}$	Návrhová pevnost ve smyku
$g_{p(z)}$	Maximální charakteristický tlak větru
h	Výška
$I_{v(z)}$	Intenzita turbulence
k_{90}	Součinitel pro rostlé dřevo
k_c	Součinitel vzpěru
k_{cr}	Součinitel vlivu trhlin dřeva
k_{crit}	Součinitel klopení
k_{mod}	Modifikační součinitel
k_l	Součinitel turbulence

l_{ef}	Vzpěrná délka
l_v	Délka ke konci trámu
$l_{y,klopeni}$	Klopící délka k ose y
M_y	Ohybový moment k ose y
$M_{y,Rk}$	Plastický moment únosnosti svorníku
M_z	Ohybový moment k ose z
N	Normálová síla
s_k	Charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi
s	Charakteristická hodnota zatížení sněhem
t_v	Hloubka zapuštění
Re	Reynoldsovo číslo
R	Výslednice sil působících na svorník
V	Posouvající síla
V_M	Posouvající síla od ohybového momentu
v_b	Rychlost větru
$v_m(z)$	Charakteristická střední rychlost větru
w_k	Charakteristické zatížení větrem
W_y	Průřezový modul k ose y
W_z	Průřezový modul k ose z
z	Referenční výška
z_0	Parametr drsnosti
z_m	Minimální výška
γ_M	Bezpečnostní součinitel
λ	Štíhlost
λ_{rem}	Poměrná štíhlost
ρ	Hustota vzduchu
φ	Součinitel plnosti
ψ_λ	Součinitel koncového efektu
$\sigma_{m,crit}$	Kritické napětí
$\sigma_{c,0,d}$	Napětí od tlaku rovnoběžně s vlákny
$\sigma_{c,90,d}$	Napětí od tlaku kolmo k vláknům
$\sigma_{m,y,d}$	Napětí od ohybu k ose y
$\sigma_{m,z,d}$	Napětí od ohybu k ose z
$\tau_{v,d}$	Napětí od smyku

1. ÚVOD

V této diplomové práci je navržena sanace krovu kostela sv. Jana Křtitele v Hlučíně. Cílem sanace je zajištění únosnosti konstrukce a zabránění další degradace napadených prvků. Diplomová práce je provedena dle zadání na základě návrhu stavebních úprav střešního pláště kostela (zejména výměna střešní krytiny) a výsledků biologického průzkumu, který byl zpracován specializovanou firmou. Součástí návrhu stavebních úprav je geometrické zaměření konstrukce a popsání dimenzí jednotlivých prvků krovu. Podle těchto podkladů jsou vytvořeny trojrozměrné prutové modely řešených konstrukcí krovů. Tyto modely jsou tří typů. Modely nepoškozené konstrukce, které představují krov kostela po rekonstrukci, montážní modely, které slouží k ověření únosnosti prvků krovu kostela a montážních prvků v průběhu rekonstrukce a model poškozené konstrukce, který představuje konstrukci krovu kostela v současné době.

V práci jsou určeny hodnoty klimatických zatížení, zatížení stálého, před a po výměně krytiny a zatížení užitná. Z výpočetních modelů jsou získány vnitřní síly a deformace vybraných prvků, které jsou posouzeny na jejich únosnost.

V druhé části práce je navržen postup a rozsah sanace poškozených prvků krovu kostela. Jde převážně o sanaci pomocí protézování obdobným materiálem s materiálem sanovaných prvků. Připojení protéz ke zdravým částem prvků je řešeno pomocí přeplátování zajištěné svorníky. U vybraných spojů protéz a nepoškozených částí prvků krovu je posouzena jejich únosnost.

Posledním zpracovávaným tématem je porovnání vnitřních sil získaných z modelu nepoškozené konstrukce a modelu poškozené konstrukce.

2. Umístění řešené konstrukce

Řešená konstrukce krovu je součástí kostela, který se nachází ve městě Hlučín. Hlučín je středně velké město s necelými patnácti tisíci obyvateli. Rozkládá se na ploše 2113 ha. Od Ostravy je vzdálen zhruba 8 km západně.



Obrázek č. 1: Umístění Hlučína vzhledem k Ostravě

Budova kostela sv. Jana Křtitele je v Hlučíně na křižovatce ulic Zámecká a Farní, nedaleko Mírového náměstí



Obrázek č. 2: Umístění kostela v Hlučíně

3. Historie

3.1 Historie kostela sv. Jana Křtitele v Hlučíně

První zmínka o kostele sv. Jana Křtitele je z roku 1378. Tehdy byl přistavěn boční dtář. O jeho přístavbu se zasloužila opavská knížata Václav a Přemek, kteří povolili bratrům Petrovi a Kunečovi z Varty aby darovali šest kop grošů na jeho postavení. Tento dar jim pak byl potvrzen 16. Srpna 1378 olomouckým biskupem, Janem ze Středy. Datum založení kostela však známo bohužel není

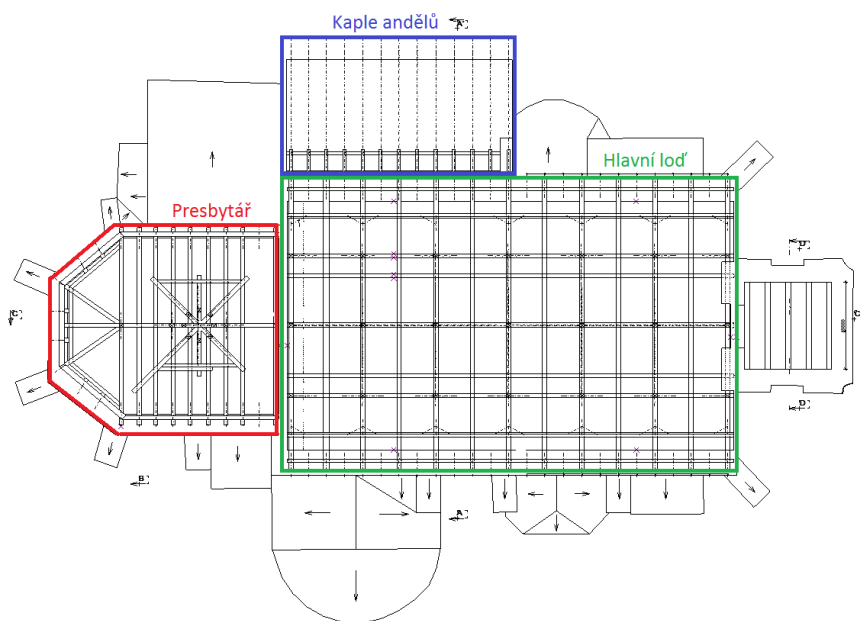
Roku 1508 je ke kostelu přistavěna kaple sv. Anny. Uvádí se, že touto přístavbou získal kostel tvar kříže, což znamená, že kaple sv. Andělů dříve nazývaná kaple sv. Tří králů musí být starší.

K další přístavbě dochází v letech 1522 až 1533. V těchto letech je přistavěna kaple sv. Michaela nyní známá jako Boží hrob. Dále je zbudován současný boční vchod, původně kaple p. Marie Egyptské.

Kostel bohužel v průběhu historie postihlo i několik nepříjemných událostí. K první dochází v roce 1597, kdy se zřítila kostelní věž a při pádu pobořila klenutí hlavní lodi a kapli sv. Tří králů. Toto poškození bylo definitivně odstraněno v roce 1608, kdy byla hlavní kostelní loď znovu zaklenuta a zvětšena kaple sv. Tří králů do dnešních rozměrů. Druhou a ještě větší katastrofou byl velký požár, který ve městě vypuknul 15. srpna 1616. Vlivem požáru spadla nová klenba hlavní lodi a zabila dva kněze. O dva roky později byl kostel znovu zaklenut a interiér obnoven. Další ránu dostal kostel za 30-ti leté války, kdy byl v roce 1645 vypleněn a vypálen Švédy. Poslední neštěstí se stalo v roce 1649, kdy po zásahu bleskem pravděpodobně přišel o věž. Nová věž byla postavena až v roce 1719.

4. Popis konstrukce krovu kostela

Krov kostela se skládá ze tří navzájem nezávislých částí, krovu nad hlavní lodí s Kaplí andělů, krovu nad presbytářem a krovu věže, který vzhledem k jeho dobrému stavu není součástí této práce.



Obrázek č. 3: Části krovu kostela

4.1 Hlavní loď

Krov hlavní lodi má 22,36 m na délku a 15,05 m na šířku. Jde o krov hambalkového typu. Sklon střechy je 50° u konců je zmírněn námětky o sklonu 43° . Hambalky ve třech úrovních rozpírají krokve a samy jsou uloženy na podélných průvlacích. Podélné průvlaky jsou pak dále podepírány třemi řadami sloupů. Zavětrování je v obou směrech řešeno ondřejskými kříži. V podélném směru jsou ondřejské kříže po celé délce, v příčném jen v každé páté vazbě.

4.2 Kaple andělů

Ke krovu hlavní lodi je připojen krov zastřešení kaple andělů. Jde o menší pultovou střechu o rozměrech 11,63 m na délku 7 m na šířku. Sklon střechy je 45° a na konci je snížen námětky o sklonu 36° . Krokve kaple jsou uloženy svými konci na krokvích hlavní lodi a pozednici, středem dále jsou ještě podepřeny vaznicemi.

4.3 Presbytář

Krov presbytáře je 11,1 m dlouhý a 9,8 m široký sklon střechy je přes 60° , u konců zmírněný námětky o sklonu 50° . Jde o sedlovou střechu zakončenou na jedné straně zdí a na druhé trojnou valbou. Krokve jsou rozepřeny hambálky, které jsou podepřeny masivními trámy a tvoří spolu tuhý rám. Do krovu prochází sloupy osmiboké věže se zvonem „umíráčkem“. Její sloupy jsou uloženy na hvězdicovitém roštu z vazných trámů. Zavětrování krovu je řešeno soustavou tlačných diagonál umístěných v rovině střechy pod krokvemi.

5. Zhodnocení stavu poškození krovu kostela

Z orientačního mykologického průzkumu, vypracovaného v roce 2011 firmou DEREK - KALUŽA s.r.o., jasně vyplývá, že krov kostela je v důsledku poškození biodegradací ve špatném stavu a je nutná jeho sanace.

5.1 Hlavní loď

Hlavní loď má poškozeno celkem 11 vazných trámů z celkových 26, zároveň s nimi jsou poškozeny i krokve. Jedná se vždy o poškození zhlaví těchto prvků. Dále je poškozeno několik námětků krokví a na několika místech pozední trámy. Poškození jsou způsobena dřevokazným hmyzem a houbami. Tato poškození jsou natolik vážná, že je nutná výměna napadených částí, nebo celých prvků.



Obrázek č. 4: Poškození vazných trámů hlavní lodi

5.2 Kaple andělů

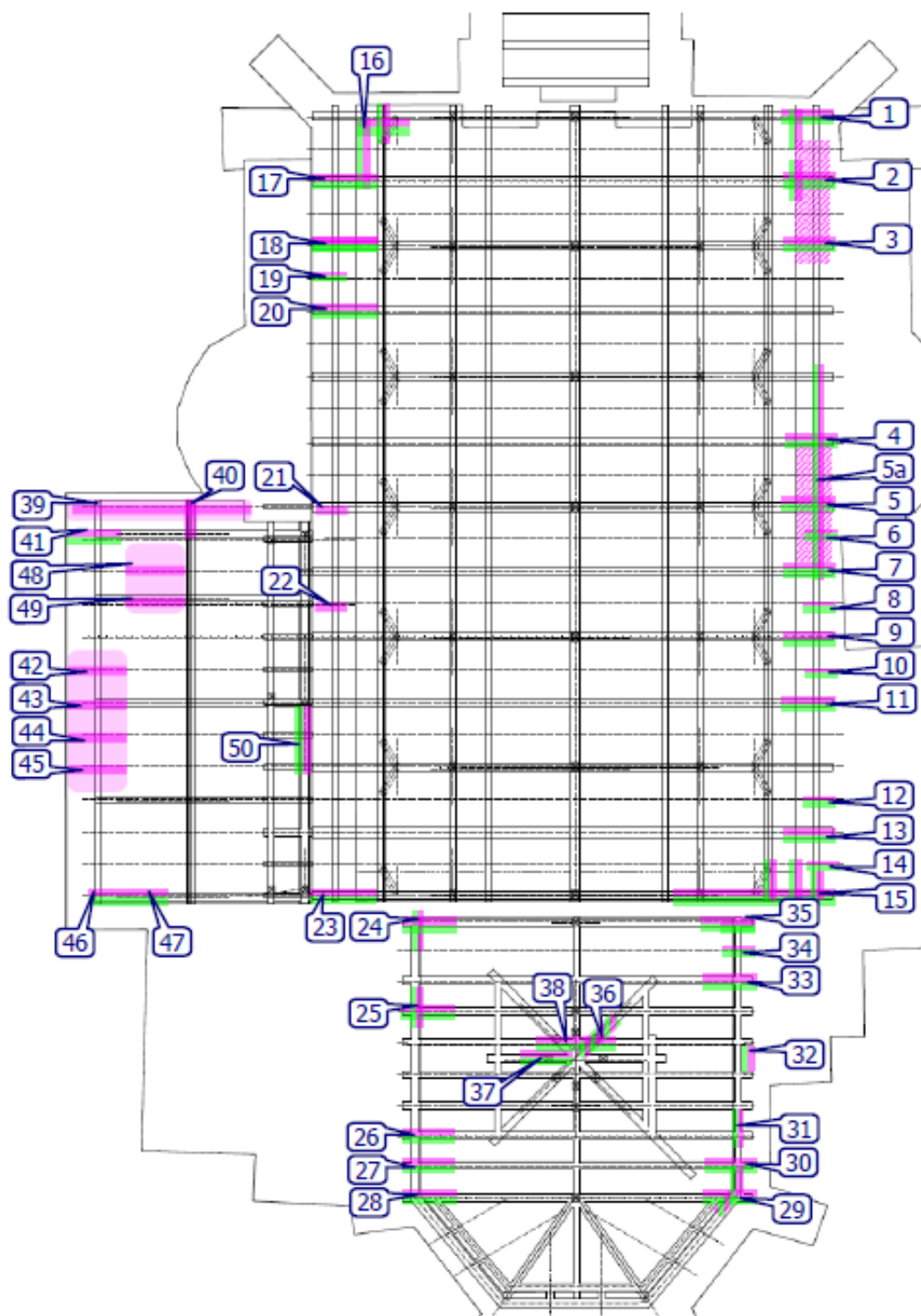
Na Kapli andělů jsou napadeny pouze dva vazné trámy. Mnohem četnější, než na hlavní lodi, je napadení námětků, kterých je napadena většina. Dále jsou poškozeny tři krokve v jejich zhlaví. U dvou krokví je poškození i po délce krokve a tak bude muset být provedena výměna ve větším rozsahu, než u krokví hlavní lodi. Vaznice umístěná u zdi kostela je rovněž lokálně poškozena.

5.3 Presbytář

V krovu presbytáře bylo zjištěno poškození osmi vazných trámů z celkových osmnácti a části vazných trámů kříže podpírající věž „umíráčku“. Další zjištěná poškození jsou obdobná jako u krovu hlavní lodi a nacházejí se v blízkosti okapu.



Obrázek č. 5: Poškození vazného trámu a pozednice presbytáře



Obrázek č. 6: Plánek poškození krovu

Podrobný soupis poškození je uveden v příloze číslo 3.

6. Druhy poškození vyskytující se na krovu kostela.

V následujícím textu jsou uvedeny základní charakteristiky biodegradačních činitelů nacházejících se v krovu kostela.

6.1 Dřevokazné houby

Dřevomorka domácí

Vyvolává hnědou hnilobu. K šíření nepotřebuje mnoho vody, proto může napadat i docela suché dřevěné prvky. Vodu pro svůj rozvoj si dokáže přivést provazci, které mohou být dlouhé i několik metrů. Optimální teplota pro její rozvoj je 26 – 40 °C.

Dřevo napadené touto houbou je rychle poškozováno. Dochází k měknutí a křehnutí dřeva. Postupně se takto napadené dřevo barví do hněda. Dřevo napadené dřevomorkou je nutné odstranit z konstrukce, protože může snadno napadnout prvky ve svém okolí. [7]

Trámovka polní

Jde o běžnou dřevokaznou houbu vyskytující se po celém území České republiky. Napadá zpravidla dřevo čerstvě pokácené, ale může se vyskytnout i na již opracovaném dřevu. Způsobuje přirozenou hnilobu dřeva. Je nebezpečná tím, že odolává jak nízkým, tak i vysokým teplotám. Navíc napadá vnitřní části dřeva a i při silném napadení se povrch jeví jako nepoškozený. V případě, že se na povrchu dřeva plodnice objeví, je nutné napadenou část co nejrychleji odstranit. [7]

6.2 Dřevokazný hmyz

Červotoči

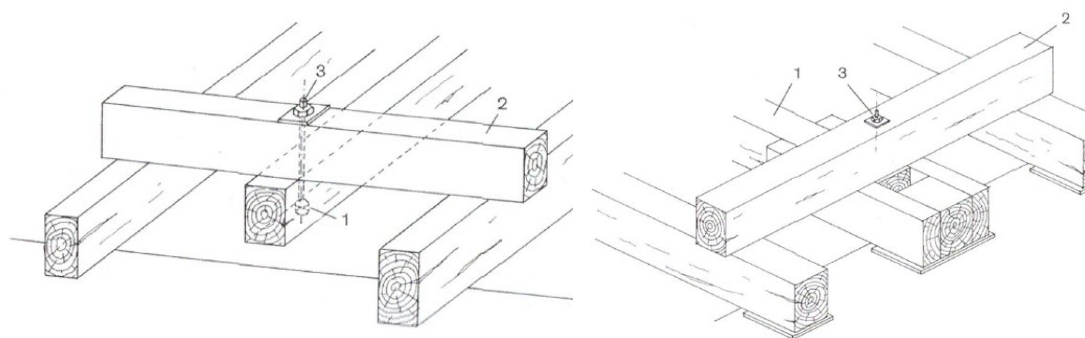
Mezi běžné druhy červotočů patří červotoč umrlčí (*Anobium pertinax*), červotoč proužkovaný (*Anobium punctatum*) a červotoč kostkovaný (*Xestofobium rufovilosum*). Červotoči jsou broučci velikosti od 2 mm do 8 mm. Dospělý jedinec se dožívá zhruba jednoho měsíce, z larvy však vyrůstá přibližně 3 roky. V případě, že jsou pro červotoče vhodné životní podmínky, napadají dřevo i další generace. Tímto opakovaným napadáním se nakonec dostaví úplné zničení napadené části dřeva. Pro život červotoče je vhodná zvýšená vlhkost dřeva, nižší teploty a malé proudění vzduchu. [7]

7. Metody sanace dřevěných konstrukcí

Sanace je činnost, která má za cíl výměnu nebo zpevnění některých prvků konstrukce. Provádí se rozsáhlé zásahy do nosných konstrukcí stavby. Metody sanace mohou být přímé nebo nepřímé. V následujícím textu jsou popsány metody sanací nejčastěji využívané v praxi.

7.1 Používané sanační metody

Nepřímé sanační metody jsou konstrukční úpravy, které mají za cíl podpořit poškozený prvek bez toho, aby se do něj větším způsobem zasahovalo. Jsou to metody řešící dočasně určitou havarijní situaci. Jedná se tedy hlavně o různá podepření, často provizorního rázu. Z nepřímých sanačních řešení, která mohou být brána jako definitivní, je například vyvěšení, kdy se poškozený prvek zavěsí na nově přidaný trámek, který je pak uložen na nepoškozených sousedních prvcích. [11]

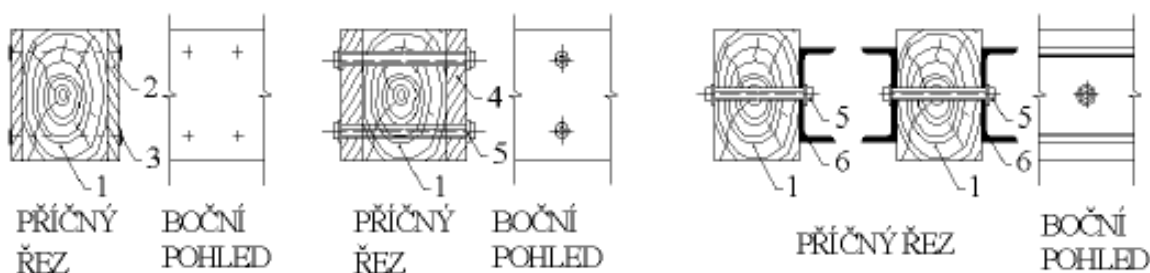


Obrázek č. 7: Příklady vyvěšení

Sanační metody přímé jsou naopak takové, při kterých se do poškozeného prvku zasahuje zásadním způsobem. Tyto úpravy pak mají trvalý ráz. Patří zde přiložkování, plombování, protézování, ukotvení do ocelové konzoly, aplikace uhlíkových vláken a konzervování zpevňující substancí. [11]

Příložkování

Provádí se při nedostatečné únosnosti a tuhosti konstrukcí. Jde o dodatečné zesílení prvku přidáním příložek. Ty mohou být přidány na boky prvku, ale i jako výškové nastavení. Příložky mohou být z různých materiálů. U historických konstrukcí nebo konstrukcí, které jsou běžně viditelné při užívání stavby, se doporučuje používat příložky dřevěné. Pokud však nejsme limitováni památkovou ochranou nebo estetickým působením, dají se využít i příložky ocelové. [11]



Obrázek č. 8: Příklady příložkování

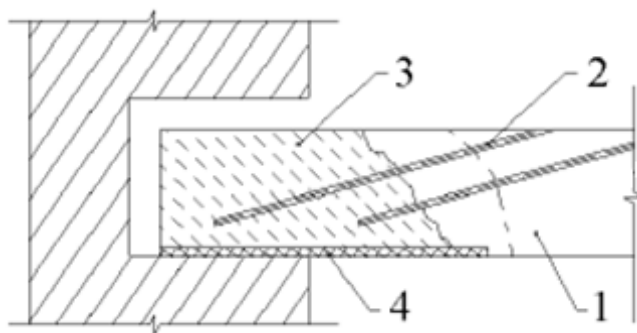
Příložky mohou být aplikovány po celé délce prvku, nebo jen lokálně v místech, kde je prvek poškozen. Připojení příložky k sanovanému prvku je zpravidla řešeno hřebíky, vruty, svorníky nebo hmoždíky. [11]

Protézování

Protézování se užívá v případech, kdy je prvek významně poškozen, ale rozsah poškození ještě není tak velký, aby bylo nutno vyměnit celý prvek. V takovém případě se poškozená část prvku odstraní a nahradí se novou částí. Jsou zachovány rozměry původního prvku i typy spojů. Klasickým způsobem připojení protézy k sanovanému prvku je přeplátování zajištěné řadou svorníků. [11]

Speciálním případem protézování je protézování metodou beta. Je to způsob používaný u historicky cenných konstrukcí. Jde o způsob protézování, kdy je odstraněná část prvku nahrazena polymerbetonem nebo epoxidovou živicí.

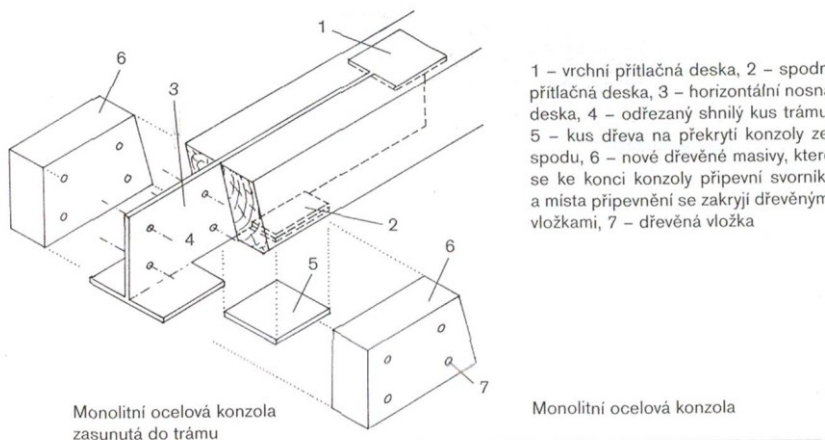
Propojení s nepoškozenými částmi sanovaného prvku je pak provedeno vlepenými sklolaminátovými tyčemi



Obrázek č. 9: Protézování metodou beta. 1 – zdravá část prvku, 2 – sklolaminátová tyč, 3 – prostor vyplněný polymerbetonem nebo epoxidovou živicí, 4 – dřevěný podkladek

Ukotvení do ocelové konzoly

Jde o způsob sanace podobný protézování. Rozdílem je, že se prvek nenahrazuje stejným materiálem. Odstraněná část je nahrazena ocelovou konzolou. V praxi je používáno několik způsobů upevnění konzoly k sanovanému prvku. Konzola může být tvořena obdélníkovou trubkou nebo dvěma U profily, do nichž je sanovaný prvek zasunut. Konzoly mohou být vytvořeny i připevněním k dolnímu okraji sanovaného prvku. Může to být například U profil nebo obrácený π profil. Takto vytvořené konzoly jsou pak k prvku připojovány svorníky. Kromě konzol, které jsou upevněny k okrajům prvků, mohou být použity i konzoly zasunuté do zářezu. Jedná se o konzoly se svislou deskou opatřenou u horního a spodního povrchu přitlačnými deskami a roznášecí deskou v místě uložení. Tento způsob je znázorněn na obrázku 10. [11]



Obrázek č. 10: Příklad zapuštěné ocelové konzoly

Plombování

K sanačním úpravám menšího rozsahu patří plombování. Není-li prvek poškozen v celém průřezu, je možné odstranit pouze poškozenou část a tu znovu doplnit zdravým materiálem. K sanovanému prvku je pak připojen pomocí vrutů, hřebíků nebo svorníků. Tato úprava je vhodná pouze k zajištění celistvosti nebo pevnosti v tlaku. [11]

Zesilování uhlíkovými vlákny

Uhlíková vlákna se ve formě pásků vlepují do vyfrézovaných drážek na dolním líci sanovaného prvku. Tyto drážky musí mít co nejrovnější povrch. Musí být tedy dokonale vybroušené. K dosažení dokonale rovného povrchu drážek se ještě do nich po vybroušení nanáší speciální vyrovnávací hmota. Teprve do takto připravených drážek se vlepují uhlíková vlákna, která pak fungují jako dodatečná tahová výztuž. Uhlíková vlákna se vyznačují velkou pevností v tahu a vysokým modulem pružnosti, mají ovšem jen nízkou požární odolnost. [13]

7.2 Sanační metody použité v této práci

Na řešené konstrukci krovu jsou prvky poškozeny většinou jen lokálně. U těchto prvků je zvolena sanační metoda protézování.

Některé prvky jsou však poškozeny ve větším rozsahu. Tyto prvky je nutno odstranit a nahradit je novými.

8. Tvorba výpočetních modelů

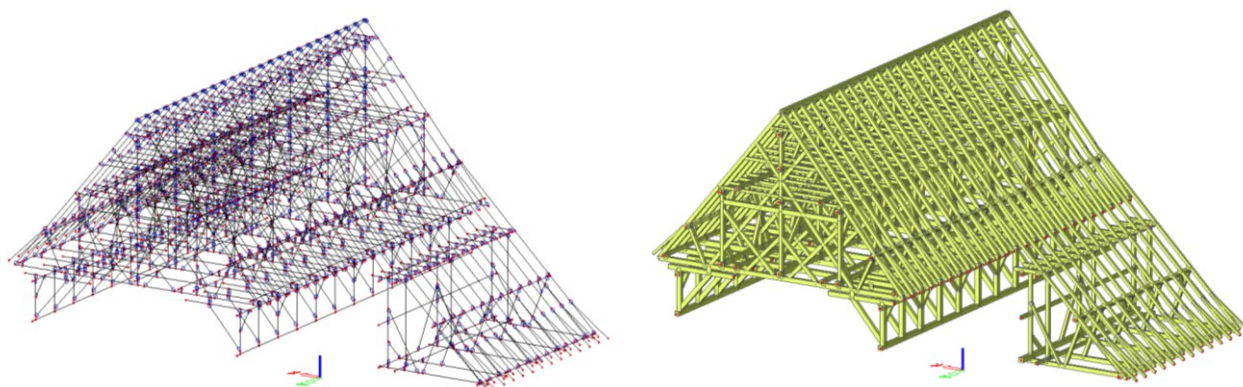
Výpočetní modely konstrukce byly vytvořeny v programu Scia Engineer. Podkladem pro práci byla výkresová dokumentace, kterou poskytla firma Kubinová + partneři, s.r.o. V práci jsou vypracovány celkem tři druhy modelů.

Modely nepoškozené konstrukce

První skupinu modelů tvoří prostorové prutové modely nepoškozené konstrukce. Tyto modely obsahují všechny prvky v rozměrech, které se na konstrukci v současné době vyskytují, a neuvažuje se s poškozenými prvky. Jde o modely, které představují krov po rekonstrukci.

Krov kostela je rozdělen do dvou nezávislých částí (hlavní loď s Kaplí andělů a krov nad presbytářem), proto jsou pro ně vytvořeny dva nezávislé prostorové prutové modely.

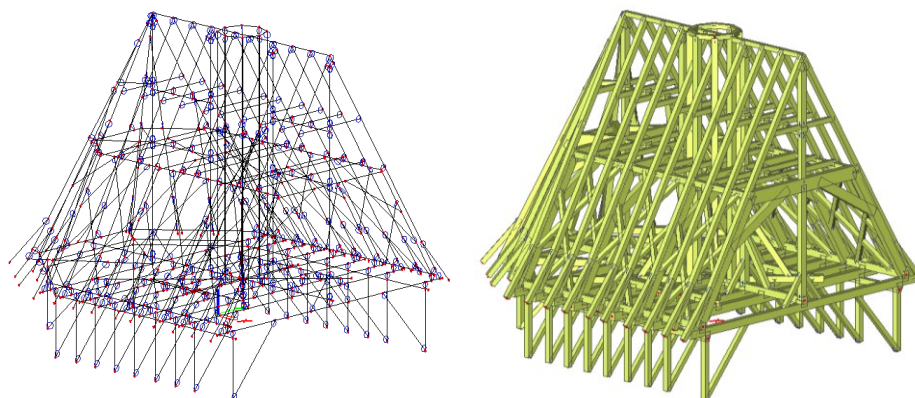
Model hlavní lodi s Kaplí andělů se skládá celkem z 1001 prvků spojených v 1815 uzlech (Obrázek 11). Na modelu krovu se nachází 82 různých průřezů prvků.



Obrázek č. 11: Hlavní loď a Kaple andělů - prutový model a model s viditelnými prvky

Modely nepoškozené konstrukce byly zatíženy všemi klimatickými a stálými zatíženími. Celkem bylo vytvořeno 13 zatěžovacích stavů, z nichž bylo vytvořeno 235 kombinací.

Druhou částí krovu je zastřešení presbytáře. K vytvoření tohoto modelu bylo použito 422 prvků spojených v 675 uzlech (Obrázek 12). Na modelu krovu presbytáře se nachází 40 různých průřezů prvků.



Obrázek č. 12: Presbytář - prutový model a model s viditelnými prvky

Modely nepoškozené konstrukce byly zatíženy všemi klimatickými a stálými zatíženími. Celkem bylo vytvořeno 12 zatěžovacích stavů, z nichž bylo vygenerováno 191 kombinací.

Montážní modely

V zadání této práce je návrh rekonstrukce krovu, proto bylo nutno vytvořit modely montážních stavů. Tyto modely byly vytvořeny pro každý sanovaný prvek. Každý model byl vytvořen vždy pro nejvíce namáhaný rekonstruovaný prvek.

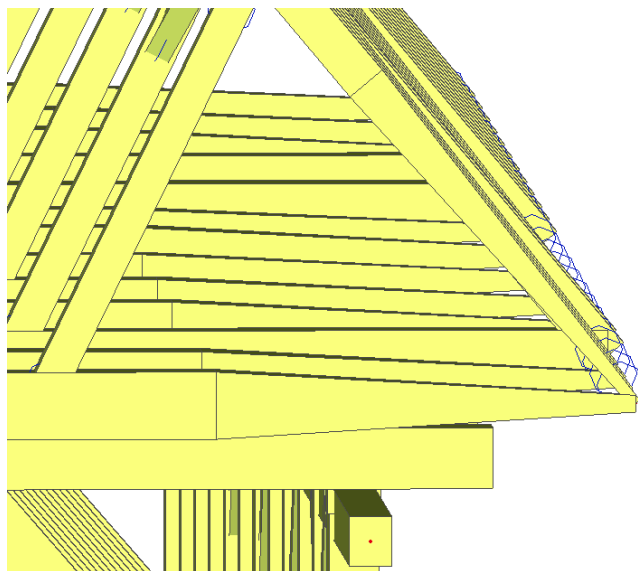
V těchto modelech byly odstraněny poškozené části prvku. Zbylé části byly případně montážně podepřeny. Díky těmto modelům bylo možno získat vnitřní síly na prvcích v okolí odstraněných, poškozených prvků a posoudit, zda v průběhu rekonstrukce bezpečně přenesou veškerá zatížení, která by mohla nastat.

Postup sanace je navržen tak, aby se nejdříve odstranila stará krytina i s bedněním a až poté probíhala rekonstrukce poškozených prvků. Pro případ, že by z nějakého důvodu tento postup nebyl dodržen, uvažují se prvky krovu stále zatíženy původní eternitovou krytinou. Zatížení sněhem se neuvažuje, protože se předpokládá, že rekonstrukce krovu nebude probíhat v zimním období.

Model poškozené konstrukce

Třetí verzi modelů tvořil model konstrukce poškozené biodegradací, který představuje současnou situaci. Tento model byl vytvořen pro krov hlavní lodi s Kaplí andělů. V modelu poškozené konstrukce byla napadená místa modelována oslabením průřezu. Toto oslabení bylo modelováno pomocí náběhů v místech poškození prvků. Náběhy byly 2 m dlouhé a od zdravé části prvku se postupně průřez snižoval až na jeho čtvrtinu.

Model byl zatížen stálým zatížením od původní eternitové krytiny a všemi klimatickými zatíženími.



Obrázek č. 13: Model oslabení poškozeného místa vazných trámů a krokví hlavní lodi

9. Materiál krovu

Součástí podkladů k této práci byl průzkum kvality a stáří dřeva krovu hlavní lodi, který byl proveden v roce 2009. Z jeho výsledků vyplývá, že krov je vyroben převážně z jedlového dřeva. Novější části a již dříve provedené opravy jsou pak hlavně ze dřeva smrkového.

Ač je většina krokví, vazných trámů a pozednic poškozena, jsou prvky zasaženy pouze lokálně, převážně ve zhlavích prvků. V ostatních částech je dřevo zdravé a podle zmiňovaného průzkumu [5] odpovídá pevnosti rostlého dřeva C24.

Ve výpočtech je tedy uvažován tento materiál.

10. Zatížení

V této kapitole jsou popsána jednotlivá zatížení, kterými byly zatíženy výpočetní modely. U jednotlivých zatížení je znázorněn postup jejich výpočtu a rozmístění na konstrukci.

Ze zatěžovacích stavů, které jsou popsány v následující kapitole, program Scia Engineer vygeneroval pro model nepoškozené konstrukce hlavní lodě s Kaplí andělů 235 kombinací, pro model nepoškozené konstrukce presbytáře 191 kombinací, pro montážní modely hlavní lodi s kaplí andělů 53 kombinací a pro montážní modely presbytáře 47 kombinací. Tyto kombinace byly typu EN-MSÚ (STR/GEO) sada B. Podrobný výpis všech těchto kombinací není vzhledem k jejich množství v této práci uveden, je však archivován u autora.

10.1 Zatížení stálé

V současné době je kostel zastřešen eternitovými šablonami. Součástí rekonstrukce je výměna této krytiny za přírodní břidlici. Byly proto vytvořeny dva zatěžovací stavy. První se stávající krytinou a druhý s krytinou novou. Hodnoty těchto zatížení jsou definovány v tabulkách 1 a 2. Dále je konstrukce zatížena vlastní tíhou jednotlivých prvků, která není v následujících tabulkách uvedena, protože se do výpočetního programu přímo nezadá. Program si ji určí sám na základě známých rozměrů prvku a materiálu. Vlastní tíha věže „umíráčku“ nad hřebenem střechy, byla do výpočetního modelu presbytáře zavedena pomocí náhradních sil do jednotlivých sloupů věže. Tíha věže byla uvažována 800 kg.

Tabulka č. 1: Stálé zatížení s novou krytinou

Nové zatížení			
Materiál	Objemová tíha γ [kN.m ⁻³]	Tloušťka [m]	Plošná tíha g_k [kN.m ⁻²]
dřevěné bednění	4,2	0,022	0,09
Břidlice	-	-	0,33
celkové			0,42

Tabulka č. 2: Stálé zatížení s původní krytinou

Původní zatížení			
Materiál	Objemová tíha γ [kN.m ⁻³]	Tloušťka [m]	Plošná tíha g_k [kN.m ⁻²]
dřevěné bednění	4,2	0,022	0,09
Eternit	18,0	0,005	0,09
celkové			0,18

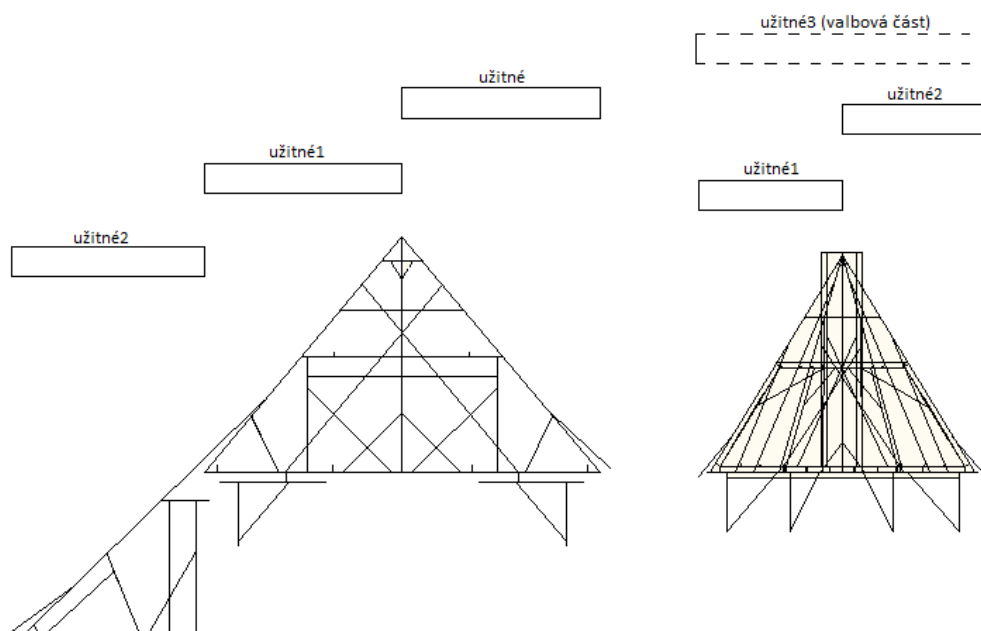
Zatížení byla do výpočetních modelů zadávána pomocí zatěžovacích panelů, které roznesly zatížení na jednotlivé prvky.

10.2 Užitná zatížení

Užitná zatížení na krov a půdu jsou uvažována pouze jako zatížení při údržbě. Střecha patří do kategorie H, což jsou střechy, nepřístupné s výjimkou běžné údržby. Hodnota tohoto zatížení je popsána v tabulce tabulka 3 a jejich rozmístění je znázorněno na obrázku číslo 14. Na výpočetní modely byla tato zatížení zavedena pomocí zatěžovacích panelů.

Tabulka č. 3: užitná zatížení

Užitná zatížení	
Místo	q_k [kN.m ⁻²]
střecha	0,75
půda	0,75



Obrázek č. 14: Zatížení užitná hlavní loď s Kaplí andělů, presbytář

10.3 Zatížení sněhem

Zatížení sněhem bylo určeno podle normy [2]. Charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi byla získána z webového portálu www.marvan.cz.

Řešený krov má několik částí s různými sklony, proto byl vytvořen soubor v programu Excel pro výpočet tohoto zatížení. V této kapitole je uveden podrobný postup výpočtu pro jeden sklon střechy, výsledky výpočtů pro ostatní sklony jsou podloženy výstupy ze zmiňovaného programu v systému Excel.

Zatížení sněhem na krokve hlavní lodi:

Sklon střechy: 50°
 Charakteristická hodnota zatížení sněhem na zemi: $0,88 \text{ kN.m}^{-2}$
 Součinitel expozice: 1
 Tepelný součinitel 1

$$\mu = 0,8 \cdot (60 - \alpha) / 30 = 0,8 \cdot (60 - 50) / 30 = 0,267$$

$$s_{1,1} = \mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,267 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,88 = 0,24 \text{ kN.m}^{-2}$$

$$s_{1,2} = 0,5 \cdot s_{1,1} = 0,5 \cdot 0,235 = 0,12 \text{ kN.m}^{-2}$$

Zatížení sněhem na ostatní části krovu:

Zatížení sněhem na ostatní části krovu je popsáno v tabulkách 4 - 9 a jeho umístění na konstrukci je znázorněno na obrázku číslo 15.

Tabulka č. 4: Zatížení sněhem na krokve hlavní lodi

Zatížení sněhem na krokve hlavní lodi						
pro sklon 50°						
μ_1 [-]	C_e [-]	C_t [-]	s_k [kN.m^{-2}]		$s_{1,1}$ [kN.m^{-2}]	$s_{1,2}$ [kN.m^{-2}]
0,267	1,000	1,000	0,880	=	0,24	0,12

Tabulka č. 5: Zatížení sněhem na námětky hlavní lodi

Zatížení sněhem na námětky hlavní lodi						
pro sklon 43°						
μ_2 [-]	C_e [-]	C_t [-]	s_k [kN.m^{-2}]		$s_{2,1}$ [kN.m^{-2}]	$s_{2,2}$ [kN.m^{-2}]
0,453	1,000	1,000	0,880	=	0,4	0,2

Tabulka č. 6: Zatížení sněhem na krokve kaple andělů

Zatížení sněhem na krokve kaple andělů						
pro sklon 45°						
μ_1 [-]	C_e [-]	C_t [-]	s_k [kN.m ⁻²]		$s_{1,1}$ [kN.m ⁻²]	$s_{1,2}$ [kN.m ⁻²]
0,400	1,000	1,000	0,880	=	0,35	0,18

Tabulka č. 7: Zatížení sněhem na námětky kaple andělů

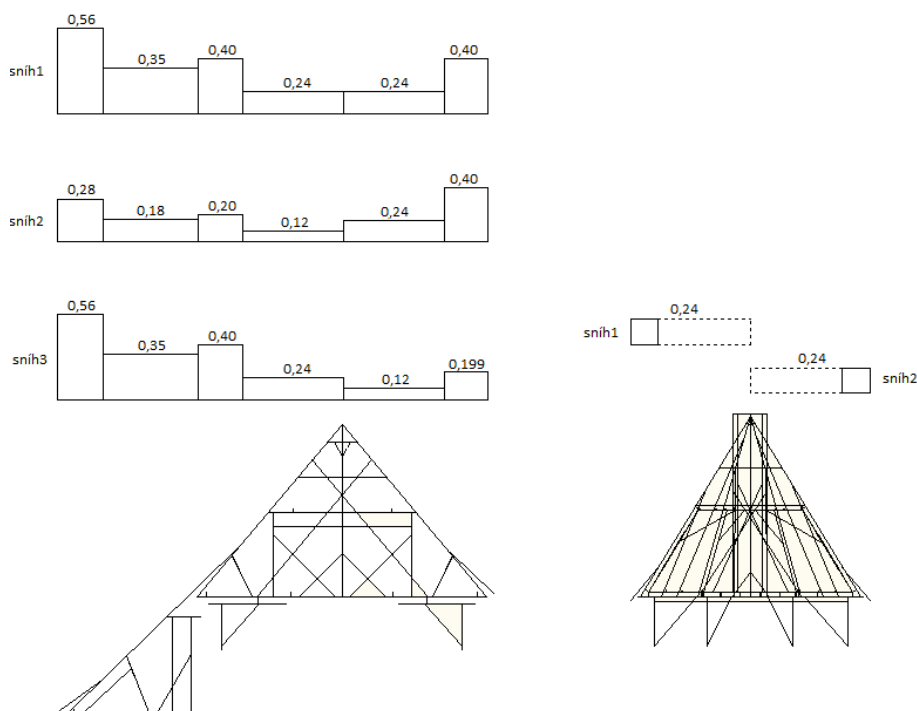
Zatížení sněhem na námětky kaple andělů						
pro sklon 36°						
μ_2 [-]	C_e [-]	C_t [-]	s_k [kN.m ⁻²]		$s_{2,1}$ [kN.m ⁻²]	$s_{2,2}$ [kN.m ⁻²]
0,640	1,000	1,000	0,880	=	0,56	0,28

Tabulka č. 8: Zatížení sněhem na krokve presbytáře

Zatížení sněhem na krokve presbytáře						
pro sklon 60°						
μ_1 [-]	C_e [-]	C_t [-]	s_k [kN.m ⁻²]		$s_{1,1}$ [kN.m ⁻²]	
0,000	1,000	1,000	0,880	=	0,00	

Tabulka č. 9: Zatížení sněhem na námětky presbytáře

Zatížení sněhem na námětky presbytáře						
pro sklon 50°						
μ_2 [-]	C_e [-]	C_t [-]	s_k [kN.m ⁻²]		$s_{2,1}$ [kN.m ⁻²]	
0,267	1,000	1,000	0,880	=	0,24	



Obrázek č. 15: Zatížení sněhem hlavní loď s Kaplí andělů, presbytář

Zatížení byla do výpočetních modelů zadávána pomocí zatěžovacích panelů, které roznesly zatížení na jednotlivé prvky.

10.4 Zatížení větrem

Posuzovaná konstrukce se nachází v Hlučíně. Tato lokalita spadá do větrné oblasti II. Typ terénu byl zvolen II, protože řešená stavba je nejvyšší budovou v okolí a tak je vystavena větším účinkům větru než nižší budovy v oblasti. Vzhledem k tomu že se ve střeše nenachází žádná okna ani jiné otvory, nebylo uvažováno s vnitřním přetlakem (c_{pe} a c_{pi} rovno nule).

Při výpočtu zatížení větrem nebylo uvažováno s vlivem turbulencí, které mohou vznikat za věží kostela. Rozměry věže jsou v porovnání s rozměry krovu výrazně menší, proto je i případný vliv od turbulencí možno zanedbat.

Pro určení zatížení větrem byl obdobně jako u sněhu vytvořen soubor v Excelu. I tady tedy byl uveden podrobný postup výpočtu zatížení na jednom příkladu a další výpočty doloženy výstupy z tohoto Excelu.

Zatížení větrem - hlavní loď – příčný vítr

Součinitel směru větru: $c_{dir} = 1$

Součinitel ročního období: $c_{season} = 1$

Součinitel ortografie: $c_{0(z)} = 1$

Parametr drsnosti: $z_0 = 0,05$

Minimální výška: $z_m = 2$

Rychlost větru: $v_b = 25 \text{ m.s}^{-1}$

Hustota vzduchu: $\rho = 1,25 \text{ kg.m}^{-3}$

Referenční výška: $z = 30 \text{ m}$

Součinitel turbulence: $k_I = 1$

Základní rychlost větru $v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot c_{0(z)} \cdot v_{b,0} = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 25 = 25$

Součinitel turbulence $k_r = 0,19(z_0/z_{0,II})^{0,07} = 0,19(0,05/0,05)^{0,07} = 0,19$

Součinitel drsnosti $c_r = k_r \cdot \ln(z/z_0) = 0,19 \cdot \ln(30/0,05) = 1,215$

Charakteristická střední rychlost větru

$$v_{m(z)} = c_r \cdot c_0 \cdot v_b = 1,215 \cdot 1 \cdot 25 = 30,385 \text{ m.s}^{-1}$$

Intenzita turbulence
$$I_{v(z)} = \frac{k_I}{c_{0(z)} \ln \frac{z}{z_0}} = \frac{1}{1 \cdot \ln \frac{30}{0,05}} = 0,156$$

Maximální charakteristický tlak

$$q_p(z) = [1 + 7I_{v(z)}] \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_{m(z)}^2 = [1 + 7 \cdot 0,156] \cdot 0,5 \cdot 1,25 \cdot 30,385^2 = 1,21 \text{ kN.m}^{-2}$$

Podle normy [3] je plocha střechy rozdělena do několika částí. Hodnoty součinitele vnějšího tlaku c_{pe} byly získány interpolací z tabulek uvedených v normě [3].

Tabulka č. 10: Interpolace koeficientu $C_{pe,10}$ pro úhel střechy 50°

	Úhly střechy	$C_{pe,10}$
F	45	0,700
	50	0,700
	60	0,700
	Úhly střechy	$C_{pe,10}$
H	45	0,600
	50	0,633
	60	0,700
	Úhly střechy	$C_{pe,10}$
J	45	0,000
	50	-0,100
	60	-0,300
	Úhly střechy	$C_{pe,10}$
G	45	0,700
	50	0,700
	60	0,700
	Úhly střechy	$C_{pe,10}$
I	45	0,000
	50	-0,067
	60	-0,200

Výsledné zatížení bylo pak zjištěno ze vztahu:

$$w_k = q_p(z) \cdot c_{pe}$$

Výslední zatížení jsou uvedena v následující tabulce.

Tabulka č. 11: Zatížení větrem na jednotlivé oblasti střechy hlavní lodi – příčný vítr

Hlavní loď směr příčný		
$w_k^F =$	0,85	kN.m^{-2}
$w_k^G =$	0,85	kN.m^{-2}
$w_k^H =$	0,77	kN.m^{-2}
$w_k^I =$	-0,08	kN.m^{-2}
$w_k^J =$	-0,12	kN.m^{-2}

Zatížení větrem - ostatní směry a části krovu:

Tabulka č. 12: Zatížení větrem na jednotlivé oblasti střech

Hlavní loď směr podélný		
$w_k^F=$	-1,33	kN.m^{-2}
$w_k^G=$	-1,61	kN.m^{-2}
$w_k^H=$	-1,05	kN.m^{-2}
$w_k^I=$	-0,60	kN.m^{-2}

Hlavní loď směr příčný		
$w_k^F=$	0,85	kN.m^{-2}
$w_k^G=$	0,85	kN.m^{-2}
$w_k^H=$	0,77	kN.m^{-2}
$w_k^I=$	-0,08	kN.m^{-2}
$w_k^J=$	-0,12	kN.m^{-2}

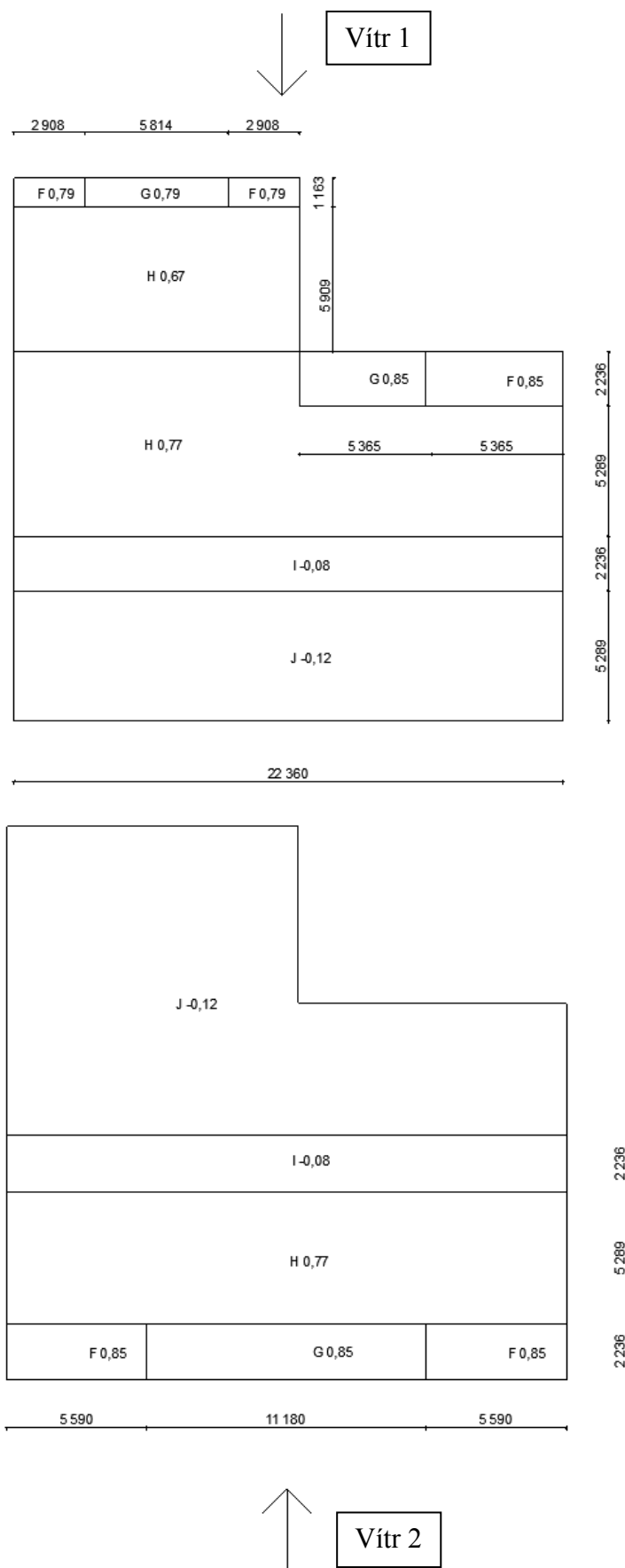
Kapse andělů směr podélný		
$w_k^{\text{Flow}}=$	-1,46	kN.m^{-2}
$w_k^G=$	-1,57	kN.m^{-2}
$w_k^H=$	-1,12	kN.m^{-2}
$w_k^I=$	-1,01	kN.m^{-2}

Kapse andělů směr příčný		
$w_k^F=$	0,79	kN.m^{-2}
$w_k^G=$	0,79	kN.m^{-2}
$w_k^H=$	0,67	kN.m^{-2}

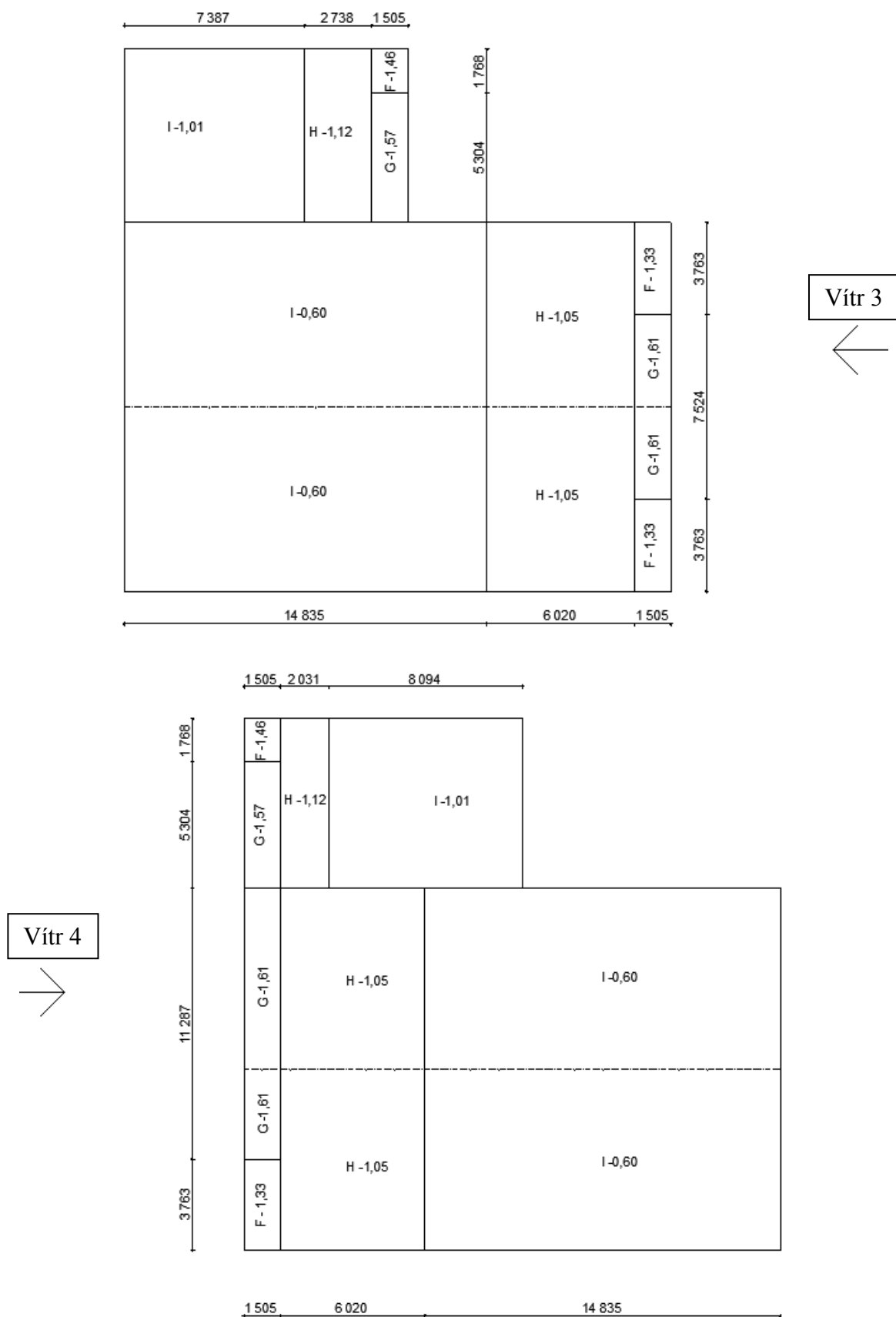
Presbytář hodnoty pro oba směry		
$w_k^F=$	0,87	kN.m^{-2}
$w_k^G=$	0,87	kN.m^{-2}
$w_k^H=$	0,87	kN.m^{-2}
$w_k^I=$	-0,36	kN.m^{-2}
$w_k^J=$	-0,72	kN.m^{-2}
$w_k^K=$	-0,36	kN.m^{-2}
$w_k^L=$	-1,44	kN.m^{-2}
$w_k^M=$	-0,48	kN.m^{-2}
$w_k^N=$	-0,24	kN.m^{-2}

V normě [3] není přesně uvedeno rozvržení oblastí pro zatížení větrem na střechu se třemi valbami. Při určení oblastí pro zatížení střechy presbytáře bylo východiskem rozvržení tlaků a sání větru pro klasickou valbovou střechu, vhodně přizpůsobené na posuzovaný tvar střechy. Zatěžovací plochy pro střechu hlavní lodi a Kaple andělů byly určeny jako kombinace zatěžovacích ploch pro sedlovou a pultovou střechu dle normy [3]. Zatěžovací plochy pro hlavní loď s Kaplí andělů na obrázku 16 (příčný vítr) a 17 (podélný vítr) a pro presbytář jsou zobrazeny na obrázku 18 (příčný vítr) a 19 (podélný vítr).

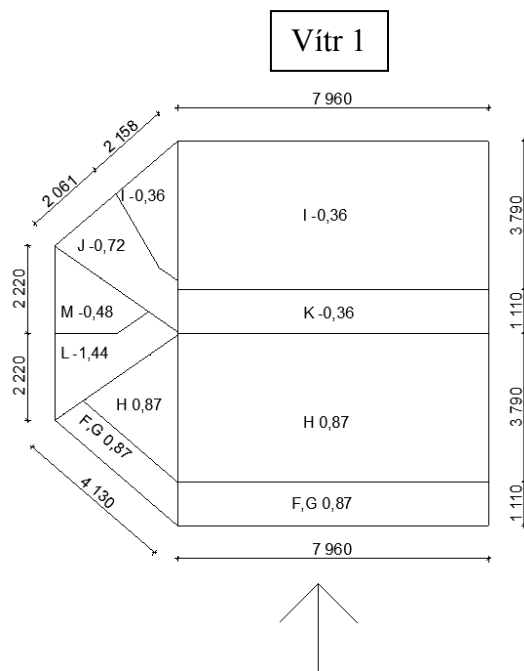
Zatížení byla do výpočetních modelů zadávána pomocí zatěžovacích panelů, které rozesly zatížení na jednotlivé prvky.



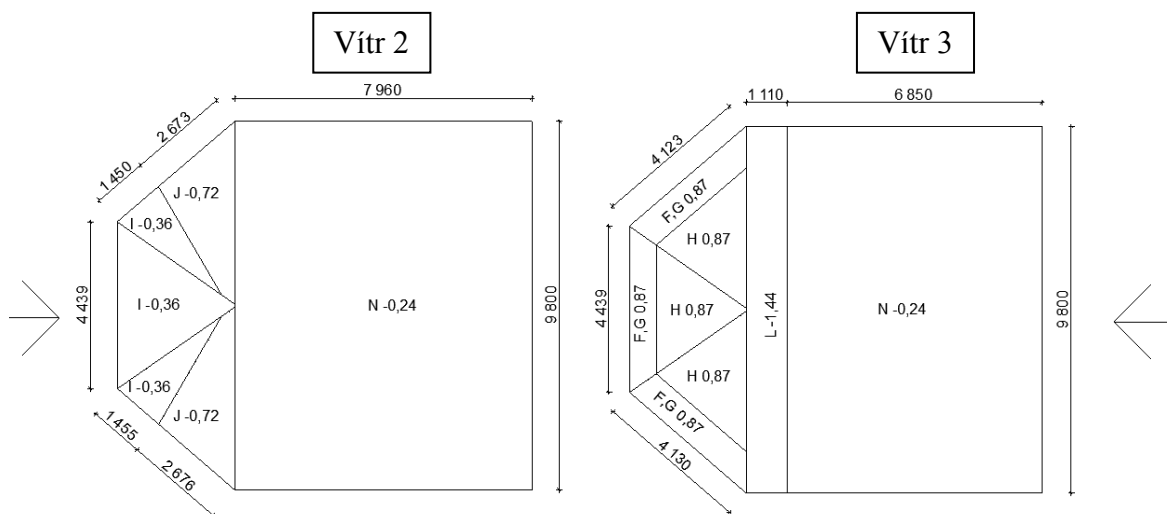
Obrázek č. 16: Zatížení větrem hlavní loď a kaple andělů – příčný vítr



Obrázek č. 17: Zatížení větrem hlavní loď a kaple andělů – podélný vítr



Obrázek č. 18: Zatížení větrem – příčný vítr



Obrázek č. 19: Zatížení větrem – podélný vítr

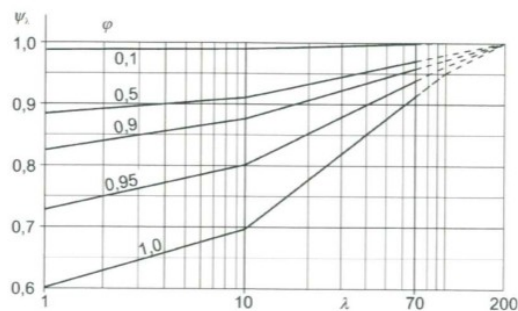
Zatížení větrem na věž – umíráček

V krovu presbytáře se nachází osmiúhelníková věž-umíráček. Část věže vystupující nad hřeben střechy, nebyla do výpočetních modelů zahrnuta. Její vliv na konstrukci krovu byl zaveden pomocí sil (reakcí) do jednotlivých sloupů věže.

Zatížení konstrukce krovu od větru působícího na věž, bylo určeno pomocí zjednodušení (byl uvažován její průmět do vertikální roviny). Průmět byl zatížen plošným zatížením stanoveným pro zatížení osmiúhelníkových sloupů dle normy [3] . Hodnota charakteristického tlaku byla určena stejným způsobem jako v případě zatížení na krov. Z plošného zatížení působícího na průmět věže byla určena náhradní síla, která byla umístěna v těžišti průmětu. Pro určení sil (reakcí), kterými mají být sloupy zatíženy, byl vytvořen malý model v programu Scia Engineer.

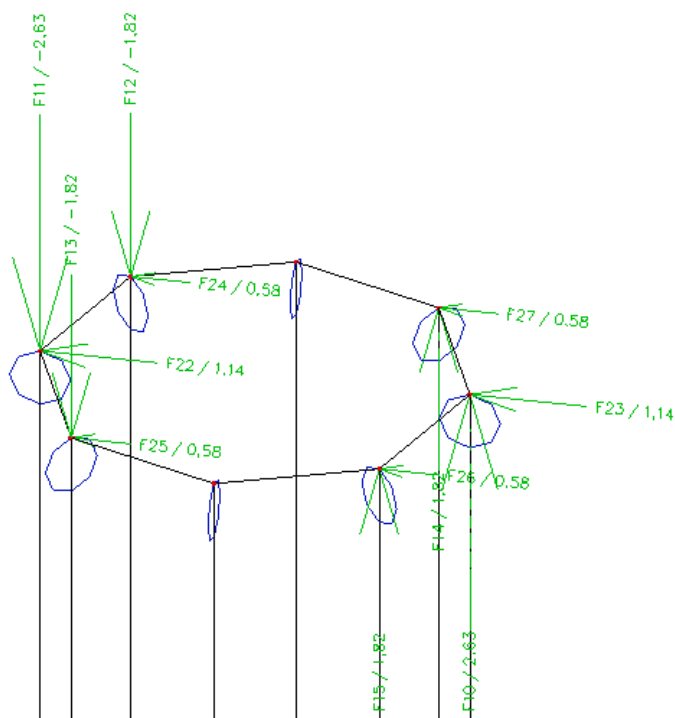
Určení zatížení:

Zaoblení rohů	$r = 0,05 \text{ m}$
Poloměr opsané kružnice	$b = 1,7 \text{ m}$
Poměr r/b	$r/b = 0,0294$
Kinematická viskozita vzduchu	$\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Výška	$z = 33 \text{ m}$
Rychlost větru ve výšce z	$v(z_e) = 30,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Reynoldsovo číslo	$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{\nu} = \frac{1,73 \cdot 30,83}{15 \cdot 10^{-6}} 4,38 \cdot 10^6$
Součinitel síly	pro poměr $r/b < 0,075$ a $Re > 3 \cdot 10^5$ $c_{f,0} = 1,3$
Celková plocha	$A_c = 5,05 \text{ m}^2$
Plocha bez otvorů	$A = 3,45 \text{ m}^2$
Efektivní štíhlost	$\lambda = 2 \cdot b/r = 2 \cdot 3,6/1,7 = 4,24$
Součinitel plnosti	$\varphi = A_c/A = 5,05/3,45 = 0,68$



Obrázek č. 20: Graf pro součinitel koncového efektu

Součinitel koncového efektu	$\psi_\lambda = 0,86$
Maximální charakteristický tlak	$q_p(z) = 1,21 \text{ kN.m}^{-2}$
Součinitel síly	$c_f = c_{f0} \cdot \psi_\lambda = 1,3 \cdot 0,86 = 1,105$
Plošné zatížení	$w_k = q_p(z) \cdot c_f = 1,335 \text{ kN.m}^{-2}$
Náhradní síla	$Q_k = A \cdot w_k = 3,45 \cdot 1,335 = 4,61 \text{ kN}$



Obrázek č. 21: Náhradní síly na věž

11. Posouzení vybraných prvků krovu – Mezní stav únosnosti

Součástí této práce je posouzení vybraných rozhodujících prvků jednotlivých částí krovů. Protože u všech prvků jde o obdobný, opakující se výpočet, nejsou v textové části rozepsány všechny posudky. Je zde uveden pouze jeden z nich a ostatní jsou zařazeny do příloh.

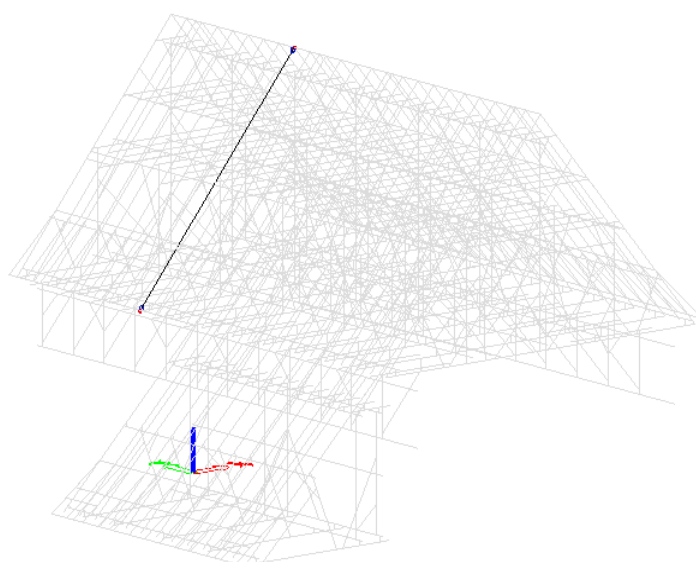
Pro posouzení prvků byl vytvořen soubor v programu Excel. Vstupem pro tento program byly maximální hodnoty vnitřních sil, které byly získány z výpočetního programu Scia Engineer, dále rozměry průřezu, vzpěrné délky a materiálové charakteristiky posuzovaného prvku.

Program stanovil napětí od ohybu k oběma hlavním osám a napětí od normálových sil. Ze zadané vzpěrné délky určil součinitel vzpěru. Na závěr vyhodnotil největší využití průřezu při kombinaci tahu/tlaku a ohybů k oběma osám.

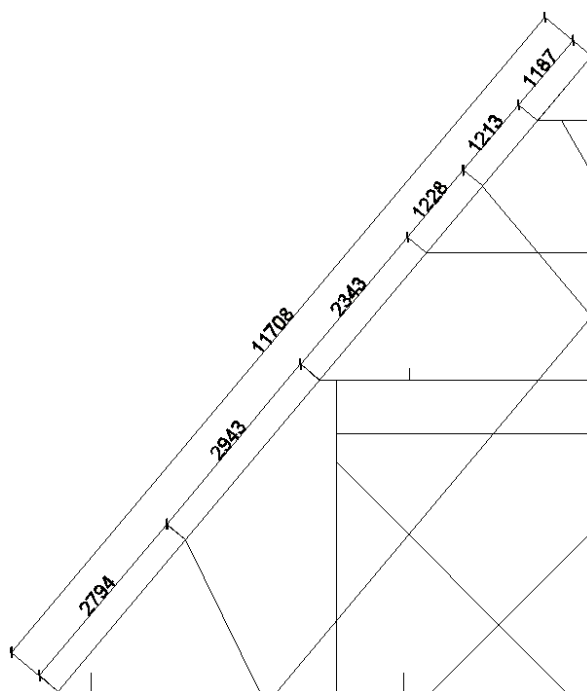
11.1 Podrobné posouzení únosnosti krokve hlavní lodě

Posudek krokve hlavní lodě na kombinaci zatížení vyvolující $M_{y\max}$

Krokev namáhaná největším M_y je prvek B244. Jeho umístění v konstrukci je patrné z následujícího obrázku.



Obrázek č. 22: Umístění prvku v konstrukci



Obrázek č. 23: Vzpěrné délky pro směr větší tuhosti (osa y)

Rozměry obdélníkového průřezu prvku:

$$b = 0,18 \text{ m}$$

$$h = 0,2 \text{ m}$$

Prvek je v místě maximálního momentu oslaben spojem:

Rozměry oslabené části:

$$b = 0,09 \text{ m}$$

$$h = 0,2 \text{ m}$$

Průřezové charakteristiky oslabené části:

$$W_y = b \cdot h^2 / 6 = 0,09 \cdot 0,2^2 / 6 = 0,0006 \text{ m}^3$$

$$W_z = b \cdot h^2 / 6 = 0,2 \cdot 0,09^2 / 6 = 0,00027 \text{ m}^3$$

$$A = b \cdot h = 0,09 \cdot 0,2 = 0,0180 \text{ m}^2$$

Materiál: C24

Třída provozu 2

Zatížení krátkodobé

k_{mod} 0,9

γ_M 1,3

Charakteristické pevnostní materiálu:

Ohyb $f_{mk} = 24 \text{ MPa}$

Tlak rovnoběžně s vlákny $f_{ck0} = 21 \text{ MPa}$

Tah rovnoběžně s vlákny $f_{tk0} = 14 \text{ MPa}$

Smyk $f_{vk} = 4 \text{ MPa}$

Modul pružnosti $E_{0,05} = 7400 \text{ MPa}$

Vliv trhlin dřeva $k_{cr} = 0,67$

Návrhové pevnosti materiálu:

$$\text{Ohyb} \quad f_{md} = \frac{k_{mod} \cdot f_{mk}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \cdot 24}{1,3} = 16,62 \text{ MPa}$$

$$\text{Tlak rovnoběžně s vlákny} \quad f_{cd0} = \frac{k_{mod} \cdot f_{ck0}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \cdot 21}{1,3} = 14,54 \text{ MPa}$$

$$\text{Tah rovnoběžně s vlákny} \quad f_{td0} = \frac{k_{mod} \cdot f_{tk0}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \cdot 14}{1,3} = 9,69 \text{ MPa}$$

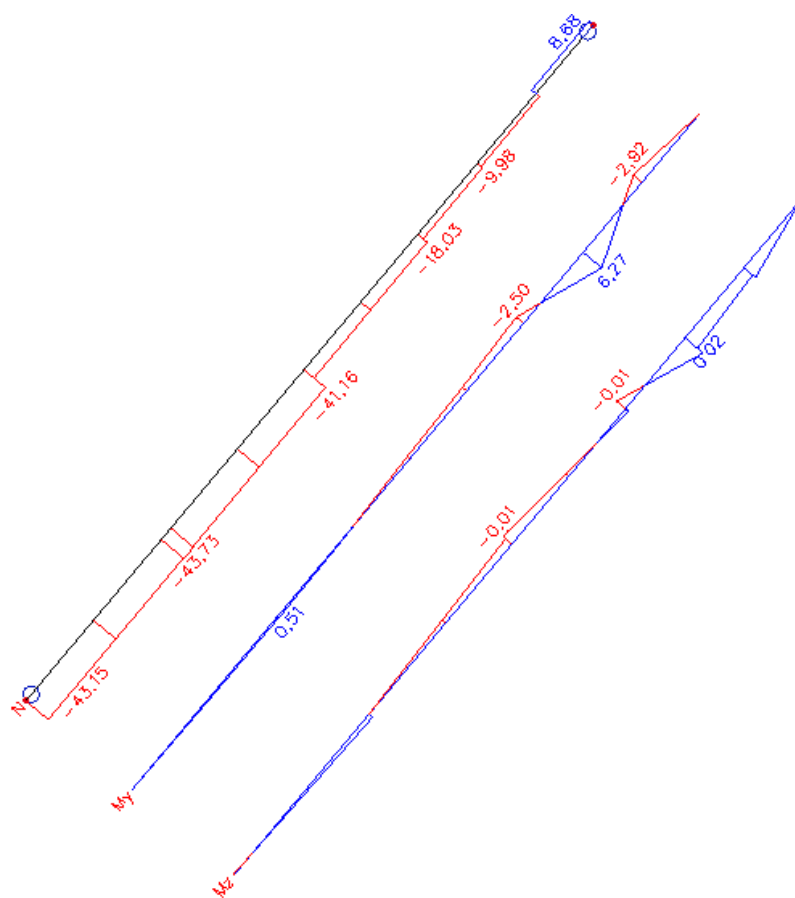
$$\text{Smyk} \quad f_{vd} = \frac{k_{mod} \cdot f_{vk} \cdot k_{ce}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \cdot 4 \cdot 0,67}{1,3} = 1,86 \text{ MPa}$$

Posouzení :

Maximální ohybový moment k ose y byl dosažen v kombinaci „únosnost nová 111“.

Tabulka č. 13: Rozhodující kombinace zatížení

Únosnost nová 111	
Zatěžovací stav	Bezpečnostní součinitel
Vlastní tíha	1,35
Stálé zatížení	1,35
Sníh 2	0,75
Vítr 2	1,5
Užitné p	1,05



Obrázek č. 24: Průběhy vnitřních sil

Tabulka č. 14: Návrhové hodnoty vnitřních sil

Návrhové hodnoty vnitřních sil:		
Normálová síla	-9,98	kN
Moment y	6,27	kNm
Moment z	0,020	kNm

Posouzení ohybu k ose y:

Vliv klopení

Klopící délka $l_{y,klopeni} = 1,228 \text{ m}$

Kritické napětí $\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 \cdot b^2}{h \cdot l_{y,klopeni}} E_{0,05} = \frac{0,78 \cdot 0,18^2}{0,2 \cdot 1,228} 7400 = 761,45 \text{ MPa}$

$$\lambda_{m,rel} = \sqrt{\frac{f_{mk}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24}{761,45}} = 0,177$$

$$\lambda_{rel,m} < 0,75 \Rightarrow k_{krit} = 1$$

Napětí od ohybu k ose y $\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{yd}}{W_y} = \frac{6,27}{0,0006 \cdot 1000} = 10,45 \text{ MPa}$

Podmínka $\sigma_{m,y,d} < f_{md} \cdot k_{krit}$

$$10,45 < 16,62 \cdot 1$$

Využití od ohybu $0,63 < 1$

Průřez vyhoví

Posouzení ohybu k ose z

Proti klopení je v ose průřez stabilizován bedněním.

Napětí od ohybu k ose z $\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{zd}}{W_z} = \frac{0,02}{0,00027 \cdot 1000} = 0,07 \text{ MPa}$

Podmínka $\sigma_{m,y,d} < f_{md} \cdot k_{krit}$

$$0,07 < 16,62 \cdot 1$$

Využití od ohybu $0,004 < 1$

Průřez vyhoví

Posouzení na tlak:

Proti vzpěru k ose menší tuhosti je průřez stabilizován bedněním.

Vzpěrná délka k ose větší tuhosti: $l_{ef} = 1,228 \text{ m}$

$$\beta_c = 0,2$$

Plocha mimo spoj $A = 0,036 \text{ m}^2$

Plocha ve spoji $A_s = 0,018 \text{ m}^2$

$$I_y = 0,00012 \text{ m}^4$$

Poloměr setrvačnosti $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{0,00012}{0,036}} = 0,0577$

Štíhlost $\lambda_z = \frac{l_{ef}}{i_z} = \frac{1,228}{0,0577} = 21,27$

Poměrná štíhlost $\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{21,277}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,361$

Součinitel vzpěrnosti $k_z = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) =$
 $= 0,5(1 + 0,2(0,361 - 0,3) + 0,361^2) = 0,571$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,571 + \sqrt{0,571^2 - 0,361^2}} = 0,986$$

Napětí od tlaku $\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{9,98}{0,018 \cdot 1000} = 0,55 \text{ MPa}$

Podmínka $\sigma_{c,0,d} < f_{c,0,d} \cdot k_{c,z}$
 $0,55 < 14,54 \cdot 0,986$
 $0,55 < 14,34$

Využití od tlaku $0,04 < 1$

Průřez vyhoví

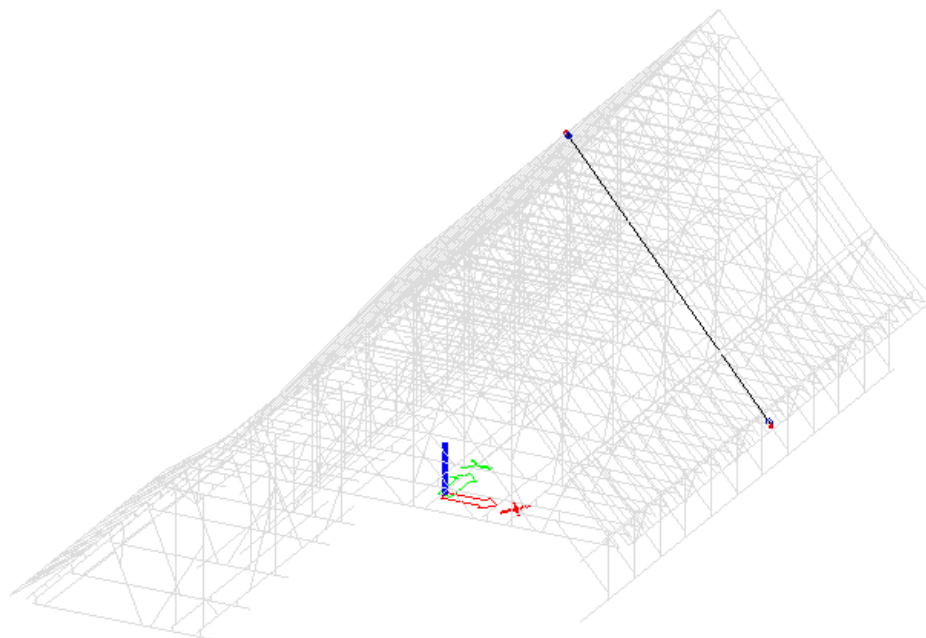
Posouzení kombinace tlaku s ohybem k oběma hlavním osám:

Podmínka $\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_y f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{k_z f_{m,y,d}} < 1$
 $\frac{0,55}{0,986 \cdot 14,54} + \frac{9,98}{1 \cdot 16,62} + 0,7 \frac{0,02}{1 \cdot 16,62} < 1$
 $0,67 < 1$

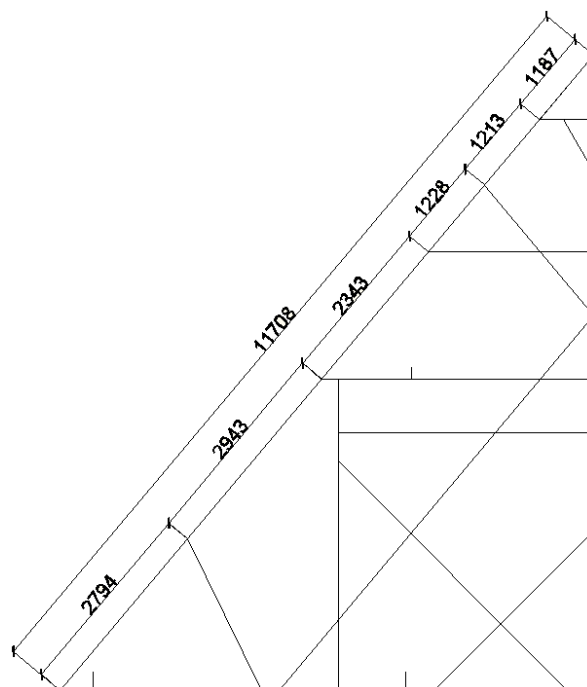
Průřez vyhoví

Posudek krokve hlavní lodě na kombinaci zatížení vyvolující maximální tlak:

Krokev namáhaná největším tlakem je prvek B217. Jeho umístění v konstrukci je patrné z následujícího obrázku.



Obrázek č. 25: Umístění prvku v konstrukci



Obrázek č. 26: Vzpěrné délky pro směr větší tuhosti (osa y)

Rozměry obdélníkového průřezu prvku:

$$b = 0,18 \text{ m}$$

$$h = 0,2 \text{ m}$$

Průřezové charakteristiky:

$$W_z = 0,001080 \text{ m}^3$$

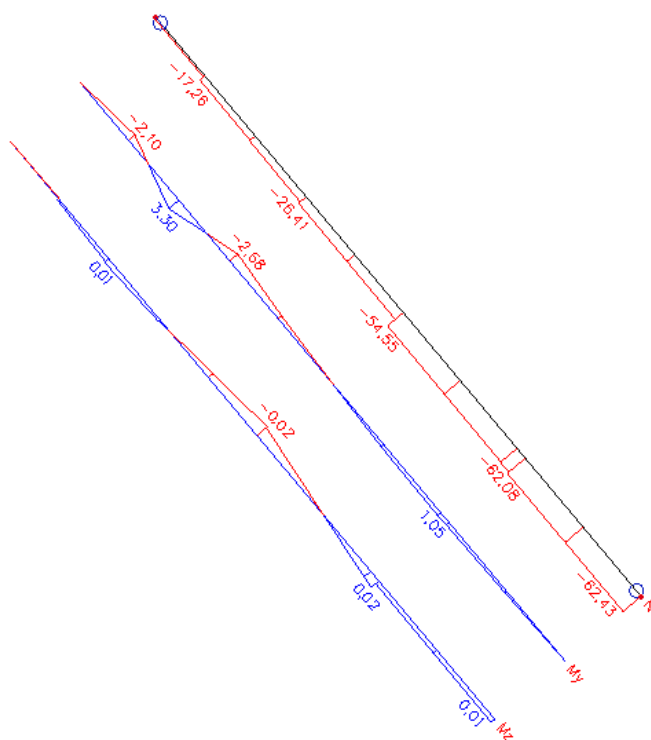
$$A = 0,0360 \text{ m}^2$$

Posouzení :

Maximální ohybový moment k ose y byl dosažen v kombinaci „únosnost nová 107“.

Tabulka č. 15: Rozhodující kombinace zatížení

Únosnost nová 107	
Zatěžovací stav	Bezpečnostní součinitel
Vlastní tíha	1,35
Stálé zatížení	1,35
Sníh 1	0,75
Vítr 1	1,5
Užitné p	1,05



Obrázek č. 27: Průběhy vnitřních sil

Tabulka č. 16: Návrhové hodnoty vnitřních sil

Návrhové hodnoty vnitřních sil:		
Normálová síla	-63,43	kN
Moment y	0	kNm
Moment z	0,01	kNm

Posouzení ohybu k ose y:

V místě maximálního tlaku je M_y rovno nule. Proto není prvek na ohyb v ose y posuzován.

Posouzení ohybu k ose z:

Proti klopení je v ose průřez stabilizován bedněním.

$$\text{Napětí od ohybu k ose z} \quad \sigma_{m,z,d} = \frac{M_{zd}}{W_z} = \frac{0,01}{0,00108 \cdot 1000} = 0,01 \text{ MPa}$$

$$\text{Podmínka} \quad \sigma_{m,y,d} < f_{md} \cdot k_{crit}$$

$$0,01 < 16,62 \cdot 1$$

$$\text{Využití od ohybu} \quad 0,001 < 1$$

Průřez vyhoví

Posouzení na tlak:

Proti vzpěru k ose menší tuhosti je průřez stabilizován bedněním.

$$\text{Vzpěrná délka k ose větší tuhosti} \quad l_{ef} = 2,794 \text{ m}$$

$$\beta_c = 0,2$$

$$\text{Plocha mimo spoj} \quad A = 0,036 \text{ m}^2$$

$$I_y = 0,00012 \text{ m}^4$$

$$\text{Poloměr setrvačnosti} \quad i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{0,00012}{0,036}} = 0,0577$$

$$\text{Štíhlost} \quad \lambda_z = \frac{l_{ef}}{i_z} = \frac{2,794}{0,0577} = 48,393$$

$$\text{Poměrná štíhlost} \quad \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{48,393}{\pi} \sqrt{\frac{21}{7400}} = 0,821$$

Součinitel vzpěrnosti

$$\begin{aligned}k_z &= 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) = \\&= 0,5(1 + 0,2(0,821 - 0,3) + 0,821^2) = 0,889 \\k_{c,z} &= \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} = \frac{1}{0,889 + \sqrt{0,889^2 - 0,821^2}} = 0,813\end{aligned}$$

Napětí od tlaku

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{62,43}{0,018 \cdot 1000} = 1,73 \text{ MPa}$$

Podmínka

$$\begin{aligned}\sigma_{c,0,d} &< f_{c,0,d} \cdot k_{c,z} \\1,73 &< 14,54 \cdot 0,813 \\1,73 &< 11,82\end{aligned}$$

Využití od tlaku

$$0,15 < 1$$

Průřez vyhoví

Posouzení kombinace tlaku s ohybem k oběma hlavním osám:

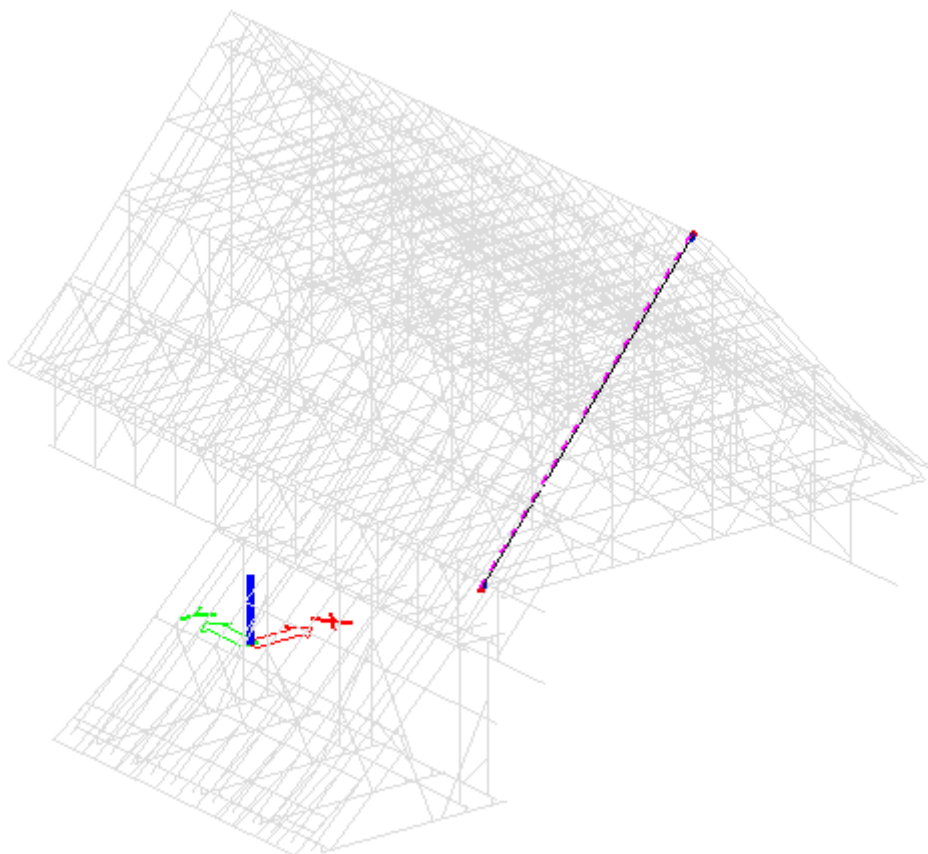
Podmínka

$$\begin{aligned}\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_y f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{k_z f_{m,y,d}} &< 1 \\ \frac{1,75}{0,813 \cdot 14,54} + 0,7 \frac{0}{1 \cdot 16,62} + \frac{0,001}{1 \cdot 16,62} &< 1 \\ 0,16 &< 1\end{aligned}$$

Průřez vyhoví

Posudek krokve hlavní lodě na kombinaci zatížení vyvolující maximální tah:

Krokev namáhaná největším tahem je prvek B415. Jeho umístění v konstrukci je patrné z následujícího obrázku.



Obrázek č. 28: Umístění prvku v konstrukci

Rozměry obdélníkového průřezu prvku:

$$b = 0,18 \text{ m}$$

$$h = 0,2 \text{ m}$$

Prvek je v místě maximálního momentu oslaben spojem:

Rozměry oslabené části:

$$b = 0,18 \text{ m}$$

$$h = 0,16 \text{ m}$$

Průřezové charakteristiky oslabené části:

$$W_y = 0,000768 \text{ m}^3$$

$$W_z = 0,00864 \text{ m}^3$$

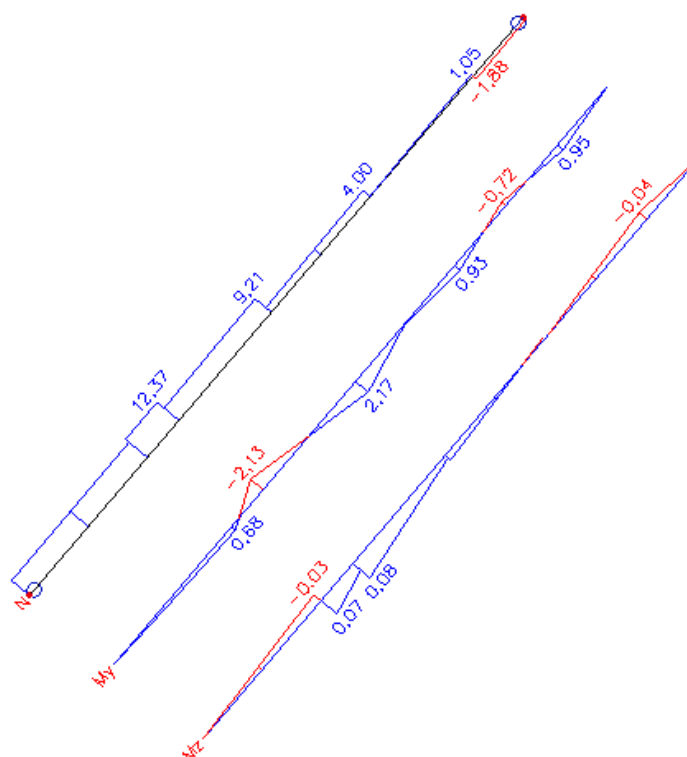
$$A = 0,0288 \text{ m}^2$$

Posouzení :

Maximální ohybový moment k ose y byl dosažen v kombinaci „únosnost nová 125“.

Tabulka č. 17: Rozhodující kombinace zatížení

Únosnost nová 125	
Zatěžovací stav	Bezpečnostní součinitel
Vlastní tíha	1
Stálé zatížení	1
Vítr 4	1,5



Obrázek č. 29: Průběhy vnitřních sil

Tabulka 18: Návrhové hodnoty vnitřních sil

Návrhové hodnoty vnitřních sil:		
Normálová síla	12,37	kN
Moment y	2,13	kNm
Moment z	0,08	kNm

Posouzení ohybu k ose y:

Vliv klopení

Proti klopení je průřez stabilizován bedněním

Napětí od ohybu k ose y
$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{yd}}{W_y} = \frac{2,13}{0,000768 \cdot 1000} = 2,77 \text{ MPa}$$

Podmínka
$$\sigma_{m,y,d} < f_{md} \cdot k_{crit}$$
$$2,77 < 16,62 \cdot 1$$

Využití od ohybu
$$0,17 < 1$$

Průřez vyhoví

Posouzení ohybu k ose z:

Proti klopení je průřez stabilizován bedněním.

Napětí od ohybu k ose z
$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{zd}}{W_z} = \frac{0,08}{0,000864 \cdot 1000} = 0,09 \text{ MPa}$$

Podmínka
$$\sigma_{m,y,d} < f_{md} \cdot k_{crit}$$
$$0,09 < 16,62 \cdot 1$$

Využití od ohybu
$$0,01 < 1$$

Průřez vyhoví

Posouzení na tah:

Napětí od tlaku
$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{ed}}{A} = \frac{12,37}{0,0288 \cdot 1000} = 0,43 \text{ MPa}$$

Podmínka
$$\sigma_{t,0,d} < f_{t,0,d}$$
$$0,43 < 9,69$$

Využití od tlaku
$$0,04 < 1$$

Průřez vyhoví

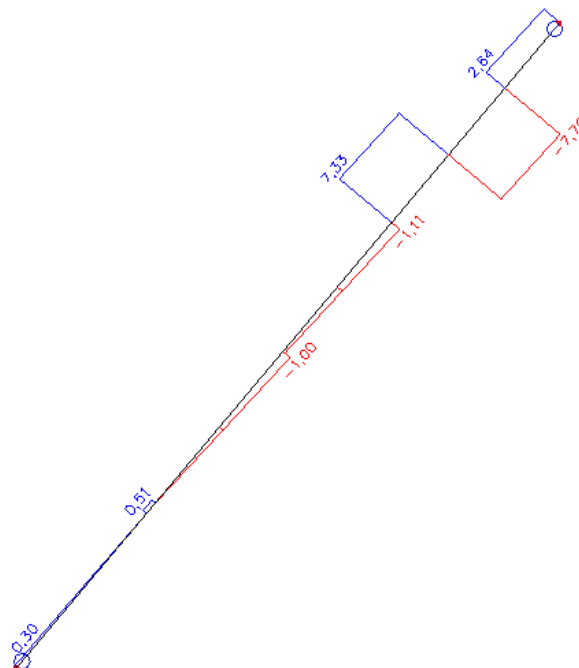
Posouzení kombinace tahu s oběma ohyby:

Podmínka
$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_y f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{k_z f_{m,y,d}} < 1$$
$$\frac{0,43}{9,69} + \frac{2,77}{1 \cdot 16,62} + 0,7 \frac{0,09}{1 \cdot 16,62} < 1$$
$$0,22 < 1$$

Průřez vyhoví

Posouzení smyku:

Maximální smyková síla je dosažena v kombinaci „únosnost nová 111“ na prvku B244.



Obrázek č. 30: Průběh posouvajících sil

Posouzení:

V místě maximální posouvající síly je prvek oslaben spojem.

Rozměry oslabené části:

$$b = 0,09 \text{ m}$$

$$h = 0,2 \text{ m}$$

Plocha ve spoji:

$$A_s = 0,018 \text{ m}^2$$

Návrhová posouvající síla:

$$V_{ed} = 7,76 \text{ kN}$$

Smykové napětí:

$$\tau_{vd} = \frac{3 \cdot V_{ed}}{2 \cdot A_s \cdot 1000} = \frac{3 \cdot 7,76}{2 \cdot 0,018 \cdot 1000} = 0,65 \text{ MPa}$$

Podmínka:

$$\tau_{vd} < f_{vd}$$

$$0,65 < 1,86$$

Využití smykem

$$0,35 < 1$$

Průřez vyhoví

11.2 Výsledky posouzení únosnosti dalších vybraných prvků

Podrobné posouzení dalších vybraných prvků je umístěno v přílohách. V této kapitole jsou znázorněny pouze výsledky posouzení. V následujících tabulkách jsou ve sloupci posouzení posuzovány hodnoty využití prvku získané kombinačními vzorci pro osovou sílu a ohyb k oběma osám.

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_y f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{k_z f_{m,y,d}} < 1$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_y f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{k_z f_{m,y,d}} < 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_y f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{k_z f_{m,y,d}} < 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_y f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{k_z f_{m,y,d}} < 1$$

Tabulka č. 19: Posouzení prvků hlavní lodi

Prvky hlavní lodi					
název prvku	maximální vnitřní síla	označení prvku	kombinace zatížení	posouzení	
šikmé ztužení	maximální My	B253	únosnost nová 111	0,23<1	vyhoví
	maximální N - tlak	B189	únosnost nová 111	0,05<1	vyhoví
	maximální N - tah	B166	únosnost nová 111	0,27<1	vyhoví
	maximální V	B274	únosnost nová 179	0,02<1	vyhoví
vazný trám	maximální My	B216	únosnost nová 109	0,28<1	vyhoví
	maximální N - tlak	B158	únosnost nová 123	0,04<1	vyhoví
	maximální N - tah	B245	únosnost nová 110	0,13<1	vyhoví
	maximální V	B274	únosnost nová 110	0,39<1	vyhoví
vaznice	maximální My	B970	únosnost nová 94	0,22<1	vyhoví
	maximální N - tlak	B973	únosnost nová 143	0,14<1	vyhoví
	maximální N - tah	B970	únosnost nová 94	0,22<1	vyhoví
	maximální V	B970	únosnost nová 94	0,22<1	vyhoví
středový sloup	maximální My	B827	únosnost nová 111	0,4<1	vyhoví
	maximální N - tlak	B759	únosnost nová 225	0,05<1	vyhoví
	maximální N - tah	B827	únosnost nová 188	0,05<1	vyhoví
	maximální V	B861	únosnost nová 107	0,11<1	vyhoví
středový hambálek	maximální My	B213	únosnost nová 110	0,66<1	vyhoví
	maximální N - tlak	B213	únosnost nová 111	0,56<1	vyhoví
	maximální N - tah	B414	únosnost nová 125	0,08<1	vyhoví
	maximální V	B213	únosnost nová 110	0,78<1	vyhoví

Tabulka č. 20: Posouzení prvků Kaple andělů

Prvky Kaple andělů					
název prvku	maximální vnitřní síla	označení prvku	kombinace zatížení	posouzení	
krokev	maximální My	B677	únosnost nová 110	0,87<1	vyhoví
	maximální N - tlak	B698	únosnost nová 177	0,31<1	vyhoví
	maximální N - tah	B705	únosnost nová 33	0,1<1	vyhoví
	maximální V	B677	únosnost nová 110	0,23<1	vyhoví
vazný trám	maximální My	B1072	únosnost nová 177	0,41<1	vyhoví
	maximální N - tlak	B1072	únosnost nová 110	0,49<1	vyhoví
	maximální N - tah	B1072	únosnost nová 125	0,18<1	vyhoví
	maximální V	B1072	únosnost nová 180	0,53<1	vyhoví
vaznice	maximální My	B650	únosnost nová 177	0,33<1	vyhoví
	maximální N - tlak	B650	únosnost nová 125	0,03<1	vyhoví
	maximální N - tah	B650	únosnost nová 107	0,06<1	vyhoví
	maximální V	B650	únosnost nová 110	0,21<1	vyhoví

Tabulka č. 21: Posouzení prvků presbytáře

Prvky presbytář					
název prvku	maximální vnitřní síla	označení prvku	kombinace zatížení	posouzení	
krokev	maximální My	B333	únosnost presbytář 87	0,50<1	vyhoví
	maximální N - tlak	B336	únosnost presbytář 92	0,11<1	vyhoví
	maximální N - tah	B335	únosnost presbytář 92	0,26<1	vyhoví
	maximální V	B380	únosnost presbytář 93	0,30<1	vyhoví
sloup věže	maximální My	B162	únosnost presbytář 84	0,44<1	vyhoví
	maximální N - tlak	B164	únosnost presbytář 80	0,13<1	vyhoví
	maximální N - tah	B162	únosnost presbytář 84	0,43<1	vyhoví
	maximální V	B162	únosnost presbytář 93	0,06<1	vyhoví
vazný trám	maximální My	B875	únosnost presbytář 92	0,16<1	vyhoví
	maximální N - tlak	B873	únosnost presbytář 117	0,07<1	vyhoví
	maximální N - tah	B875	únosnost presbytář 97	0,06<1	vyhoví
	maximální V	B875	únosnost presbytář 92	0,15<1	vyhoví

12. Návrh postupu sanace vybraných prvků krovu

Před zahájením sanačních prací je nutné důkladně odklidit všechen odpad z prostoru kleneb a celého krovu. Pro plnou efektivitu prováděných sanačních prací je potřeba očistit všechny napadené prvky od povrchových poškození. Původní prvky musí být v místě sanace řádně očištěny.

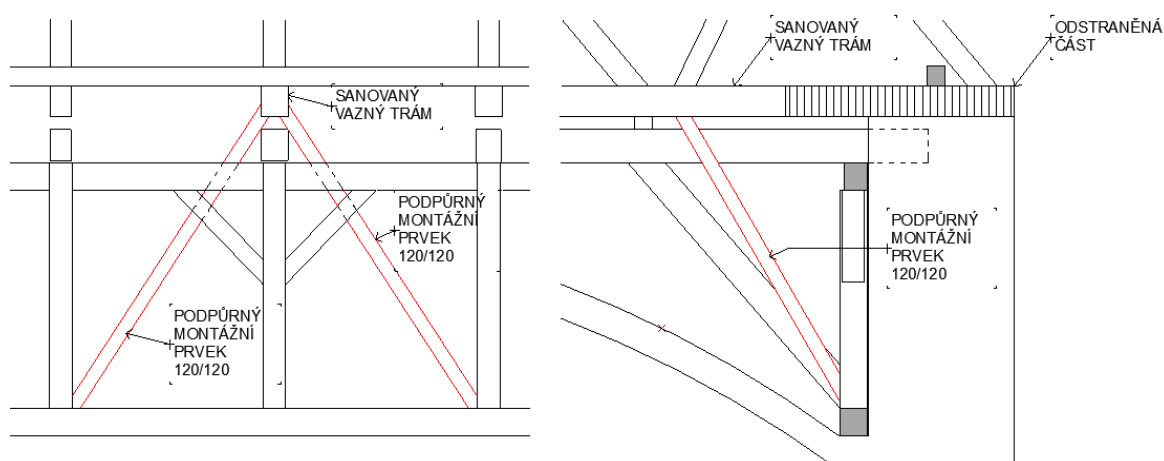
Na prvcích, u nichž je výrazné poškození, bude nutno tyto poškozené části odstranit a nahradit je novými. Jde převážně o zhlaví krokví a vazných trámů. Poškozené části těchto prvků se musí odstranit s metrovou rezervou za viditelné poškození, aby byla jistota, že bylo odstraněno veškeré napadení a zůstal už jen nepoškozený prvek. Odstraněné poškozené části musí být okamžitě odneseny z prostoru krovu a při jejich demontáži musí být dán pozor na to, aby nedošlo k potřísnění jiných prvků výtrusy dřevokazných hub.

Protézy a nové prvky, jimiž jsou nahrazovány poškozené části krovu, by měly být před jejich namontováním ošetřeny Bochemitem nebo jiným fungicidním prostředkem, stejně tak je vhodné ošetřit tímto přípravkem i nepoškozené části sanovaných prvků.

12.1 Vazný trám hlavní lodi

Vazné trámy hlaví lodi jsou napadeny hnědou hnilobou. Je proto nutná jejich sanace. Poškození se na nich vyskytuje v části zhlaví a to do cca metru. Sanace je navržena protézováním, tedy výměnou poškozené části a napojením ke zdravému zbytku prvku.

Postup sanace

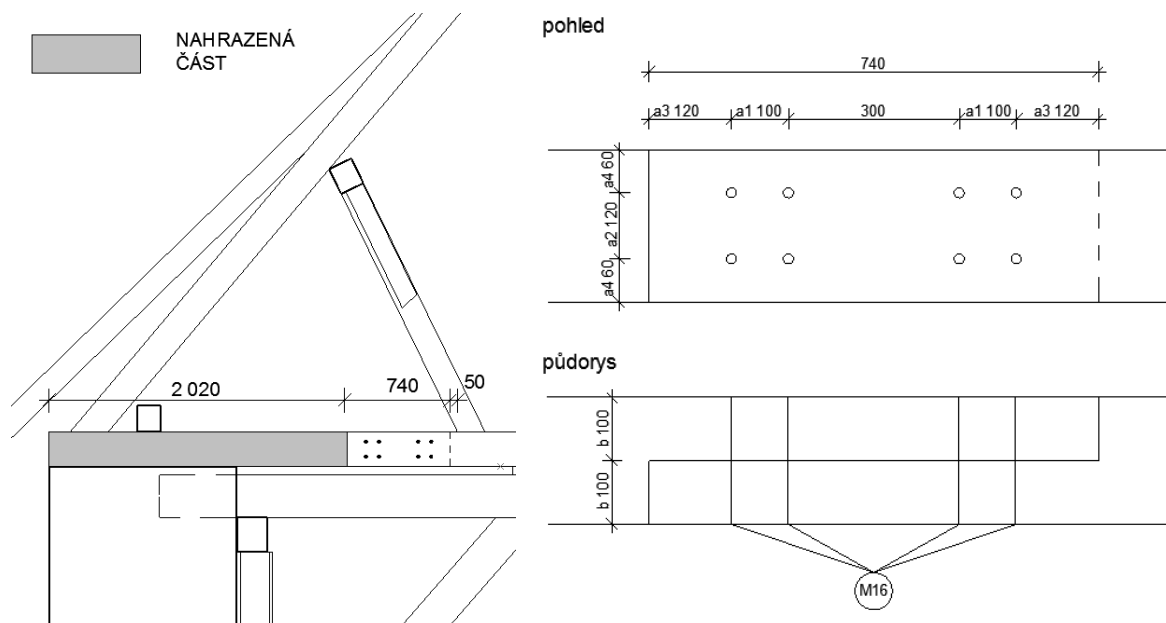


Obrázek č. 31: Montážní podepření vazného trámu

Nejdříve je nutno odstranit krytinu a bednění, nacházející se nad krokví, která je spojena s vyměňovaným vazným trámem. Tato krokev, pokud nebude sanována zároveň s vazným trámem, bude muset být přizvednuta. Přizvednutí bude provedeno pomocí dvou zvedáků umístěných na obvodové zdi propojených dřevěným trámek pod zvedanou krokví.

V případě, že bude vazný trám i krokev sanována společně, není toto opatření potřebné. Před demontáží poškozeného zhlaví vazného trámu, je ještě nutno uvolnit spoj tohoto trámu s pozednicí a pozednicí rovněž přizvednout. Zásadním opatřením při tomto sanačním zásahu je, aby byl vazný trám provizorně po dobu montáže podepřen dvojicí dřevěných stojek průřezu 120/120 opřených do pozedního trámu původní konstrukce krovu kostela, jak je znázorněno na obrázku 31. Po provedení všech těchto výše uvedených provizorních opatření je možno přistoupit k odřezání poškozené části vazného trámu a jeho nahrazení protézou.

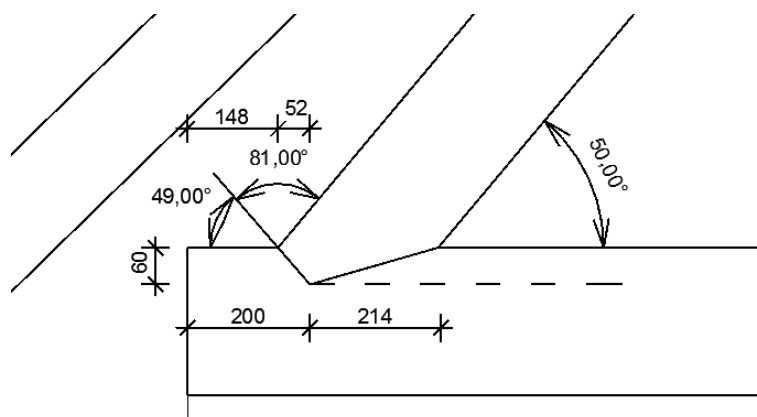
Spojení protézy a zdravé části vazného trámu bude provedeno přelátováním zajištěným skupinou čtyř svorníků ve dvou řadách obrázek 32. Únosnost tohoto spoje je posouzena v kapitole 13.



Obrázek č. 32: Nahrazená část vazného trámu a navržený přípoj protézy

Propojení vazného trámu a krokve hlavní lodi

Spojení nových částí vazného trámu a krokve bude provedeno čelním zapuštěním, které je znázorněno na obrázku 33. Únosnost tohoto spoje je posouzena v kapitole 13.



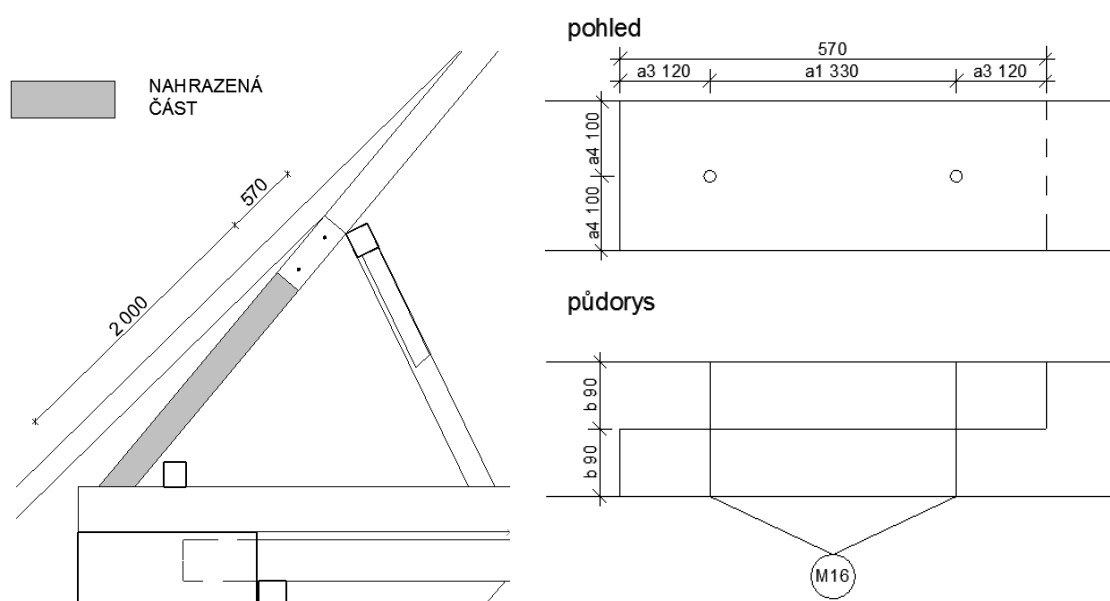
Obrázek č. 33: detail zapuštění krokve do vazného trámu

12.2 Krokve hlavní lodi

Krokve na hlaví lodi jsou napadeny hnědou hnilobou. Je proto nutná jejich sanace. Poškození se na nich vyskytuje v části zhlaví a to do cca metru. Sanace je navržena protézováním, tedy výměnou poškozené části a napojením ke zdravému zbytku prvku.

Postup sanace

Nejdříve bude nutno odstranit původní krytinu a bednění, které daná část krokve nese. Bude odstraněn námětek krokve, který bude v rámci rekonstrukce celý vyměněn. Dále bude odstraněn dvoumetrový kus krokve. Zbylou část krokve není nutno nijak montážně podepírat, protože zůstane stále podepřena vaznicí, která zatížení bez problémů přenesou.



Obrázek č. 34: Nahrazovaná část krokve a navržený přípoj protézy

Protéza krokve bude ze smrkového dřeva kvality C24. Spojení protézy a zdravé části krokve bude provedeno přeplátováním a zajištěním dvěma svorníky. Tento spoj je posouzen v příloze číslo 20.

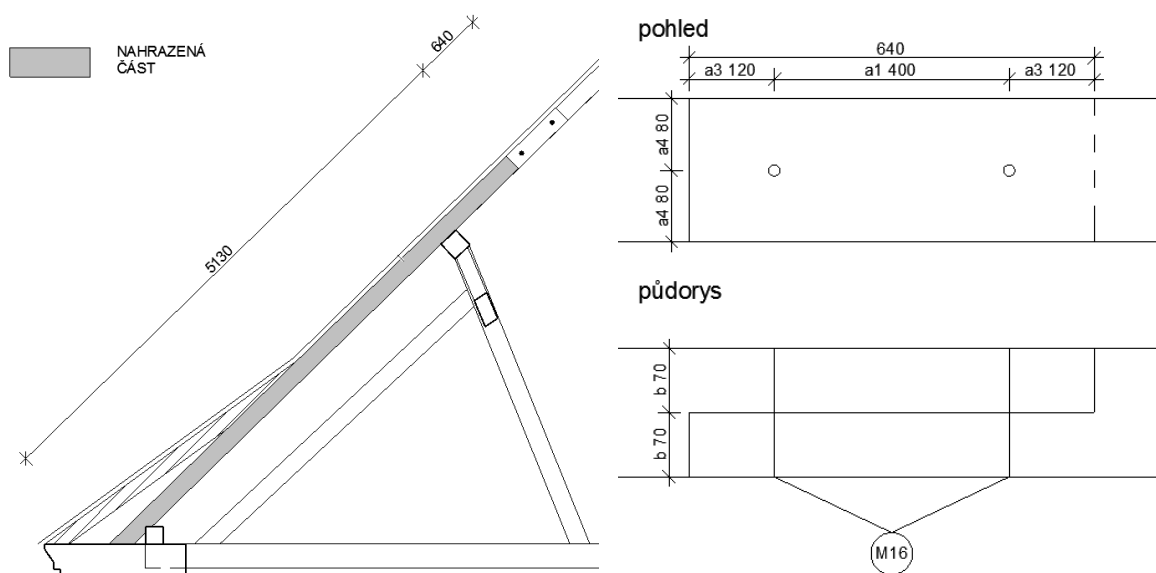
12.3 Krokev Kaple andělů

U dvou krovů je zjištěno poškození zhlaví obdobně jako u krovů hlavní lodi. Třetí a čtvrtá krokev je však poškozena až po střední vaznici. Její rekonstrukce bude tedy nutná ve větším rozsahu.

Postup sanace

Krokve poškozené pouze v oblasti zhlaví budou sanovány způsobem, který byl popsán u postupu sanace krokve hlavní lodi.

Třetí a čtvrtá krokev bude přerušena ve vzdálenosti 5,13 m od zhlaví. V průběhu montáže není nutno zbylou část krovů nijak provizorně podepírat, protože je držena horní vaznicí. Stejně jako u jiných rekonstruovaných prvků bude i zde tato oprava řešena protézováním. Protéza bude k zdravé části krokve připojena pomocí přeplátování spojeného dvěma svorníky. Únosnost svorníkového spoje je posouzena v příloze 19 vaznice za montážního stavu v příloze 16. Posouzení osedlání nové části krokve na pozednici je umístěno v kapitole 13.



Obrázek č. 35: Nahrazená část krokve Kaple andělů a navržený přípoj protézy

Protože je v tomto případě měněna téměř polovina prvku, je možnou variantou vyměnit celý poškozený prvek.

12.4 Vaznice u zdi kostela v Kapli andělů

Vaznice u zdi kostela v kapli andělů je dle průzkumu lokálně poškozena hnědou hnilobou a napadena červotočem. Napadené místo musí být tedy odstraněno a nahrazeno novým trámem o stejné dimenzi.

Postup sanace

Vodorovné vazničky, které jsou v těsné blízkosti poškozeného místa je nutno před zahájením sanace provizorně podepřít trámkem 120/120 do podélného vazného trámu, který se nachází pod sanovanou vaznicí. Po tomto provizorním zajištění je možno poškozený úsek vaznice vyříznout a nahradit protézou stejných rozměrů jako má vaznice. Propojení protézy a vaznice bude vyřešeno svorníkovým spojem. Poté mohou být teprve odstraněny provizorní vzpěry a vodorovné vazničky uloženy zpět na své místo.

12.5 Vazný trám pod věží presbytáře

Jeden z vazných trámů pod věží presbytáře je hnilobou napaden natolik, že se ve středu svého rozpětí prolomil. Sanace tohoto prvku je tedy nezbytná.

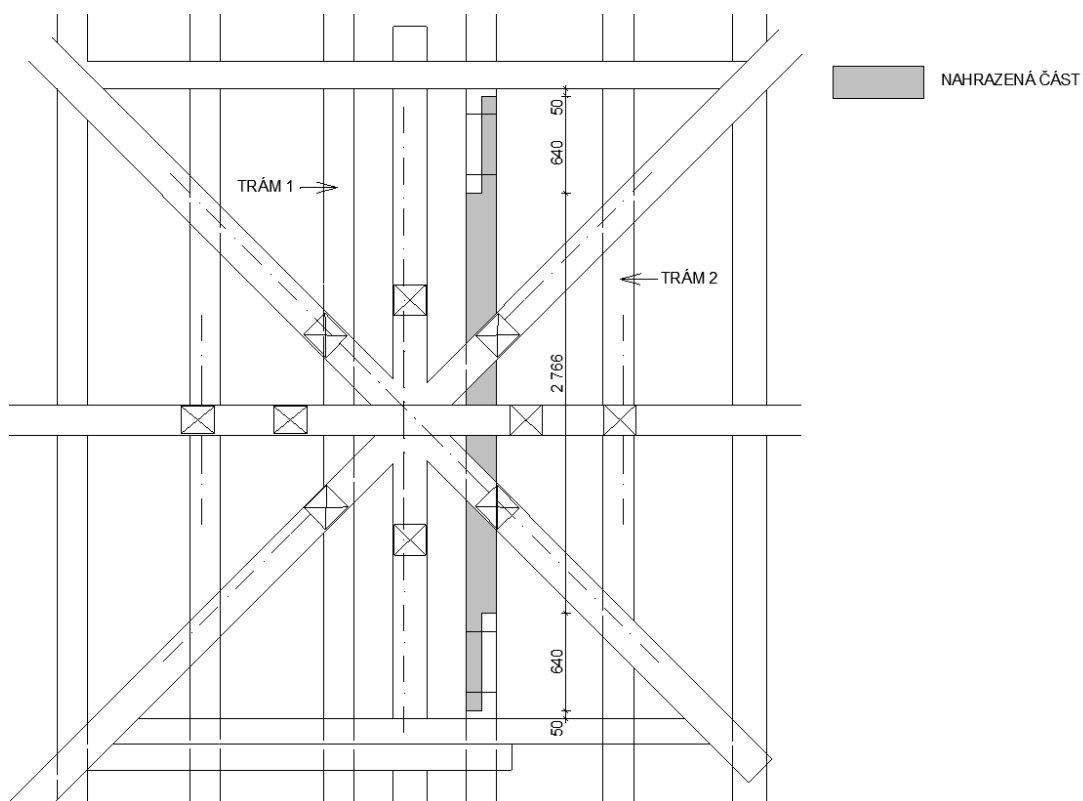
Postup sanace

Rekonstrukce tohoto prvku bude provedena tak, že se středová část vyřízne a bude nahrazena novým zdravým dřevem. To bude ke zdravé části vazného trámu připojeno pomocí přeplátování spojeného dvěma svorníky ve dvou řadách. Spoj je navržen univerzálně pro obě strany protézy a jeho posouzení je popsáno v příloze číslo 19. V průběhu výměny poškozené části budou zbylé části vazného trámu nesený trámy nad ním, s nimiž je trám propojen. Tuto skutečnost je před zahájením prací na výměně vazného trámu ověřit. Pokud by tomu tak nebylo, je nutno spoj zajistit vhodným způsobem, např. ocelovými svorníky.

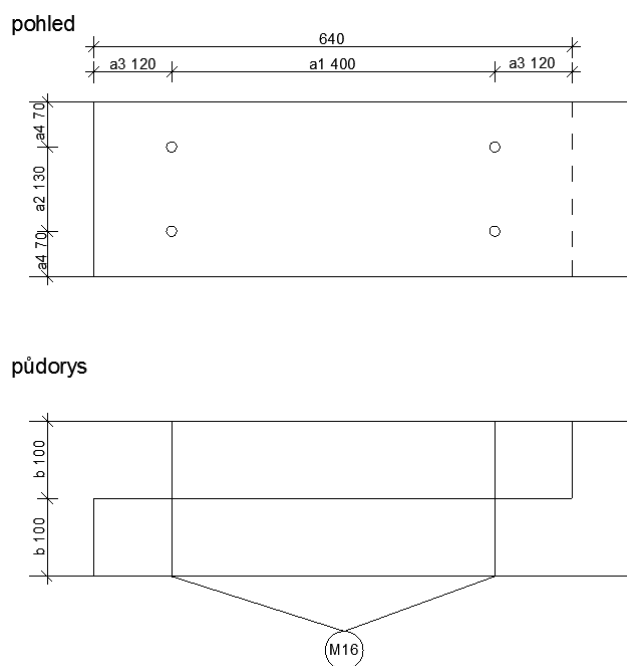
Zatížení přenášené vazným trámem bude převzato sousedními vaznými trámy, které díky jejich předimenzování zatížení v průběhu opravy bez problému přenesou. Jde o trámy 1 a 2 znázorněné na obrázku číslo 36. Posouzení těchto trámů je součástí příloh 17 a 18.

Tabulka č. 22: Posouzení vazných trámů presbytáře za montážního stavu

Trámy 1 a 2 (viz. obrázek 36)					
název prvku	maximální vnitřní síla	označení prvku	kombinace zatížení	posouzení	
Trám 1	maximální M_y	B847	montážní presbytář 8	$0,13 < 1$	vyhoví
	maximální N - tlak		montážní presbytář 28	$0,10 < 1$	vyhoví
	maximální N - tah		montážní presbytář 13	$0,05 < 1$	vyhoví
	maximální V		montážní presbytář 8	$0,12 < 1$	vyhoví
Trám 2	maximální M_y	B841	montážní presbytář 8	$0,10 < 1$	vyhoví
	maximální N - tlak		montážní presbytář 27	$0,09 < 1$	vyhoví
	maximální N - tah		montážní presbytář 4	$0,05 < 1$	vyhoví
	maximální V		montážní presbytář 9	$0,09 < 1$	vyhoví



Obrázek č. 36: Nahrazená část vazného trámu presbytáře



Obrázek č. 37: Navržený přípoj protězy vazného trámu presbytáře

12.6 Vazný trám kříže pod věží presbytáře

Jeden z vazných trámů kříže pod věží presbytáře je napaden hnědou hnilobou a červotočem. Je tedy nutná jeho výměna.

Postup sanace:

Pro zajištění stability konstrukce při výměně vazného trámu by v tomto případě bylo vhodné použití ocelových šroubovacích stojek, které mohou zajistit i přizvednutí konstrukce. Stojky by byly instalovány do spoje sloupu a šikmé vzpěry. Při výměně je nutno do nového trámu připravit otvory pro zpětné začepování sloupu a šikmé vzpěry.

13. Posouzení únosnosti vybraných spojů nosných prvků

V následujícím textu jsou uvedeny posudky únosnosti nově navržených spojů sanovaných prvků. Jsou posuzovány dva typy spojů, spoje tesařské a svorníkové

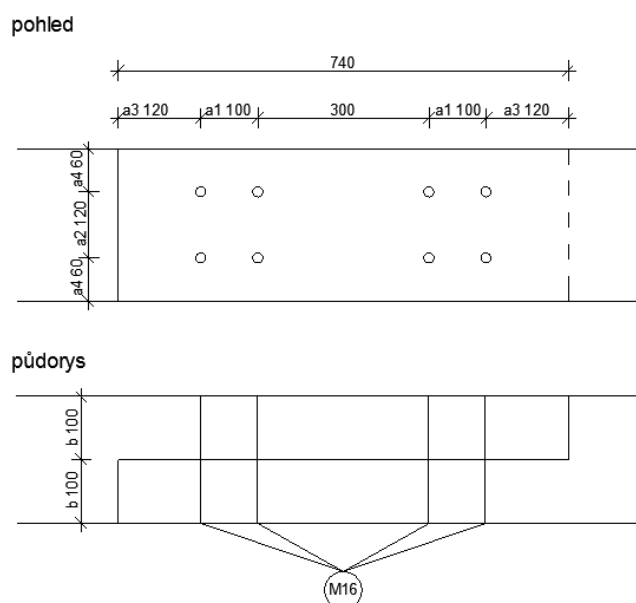
13.1 Svorníkové spoje

Svorníkové spoje jsou navrženy pro připojení protéz k nepoškozeným částem sanovaných prvků. V této práci byla posuzována únosnost celkem čtyř vybraných svorníkových spojů.

K posouzení jejich únosnosti byl vytvořen soubor v programu Excel. Výpočty únosnosti jednotlivých spojů jsou obdobné, proto je v textové části uvedeno posouzení pouze jednoho spoje. Posouzení ostatních spojů je umístěno v přílohách.

Posouzení únosnosti svorníkového spoje protézy a vazného trámu hlavní lodi.

Obrázek 38 zobrazuje posuzovaný jednostřížný svorníkový spoj připojení protézy zhlaví vazného trámu a nepoškozené části vazného trámu hlavní lodi.



Obrázek č. 38: Posuzovaný přípoj protézy vazného trámu hlavní lodě

Vlastnosti spoje:

Průměr svorníku	$d = 16 \text{ mm}$
Počet svorníků	$n = 8 \text{ kusů}$
Charakteristická pevnost svorníku	$f_{u,k} = 300 \text{ MPa}$
Tloušťka 1. Dřeva	$t_1 = 100 \text{ mm}$
Tloušťka 2. Dřeva	$t_2 = 100 \text{ mm}$
Hustota dřeva	$\rho_k = 350 \text{ kg.m}^{-3}$

Posouzení spoje na maximální ohybový moment:

Návrhový ohybový moment: $M_{ed} = 6,82 \text{ kNm}$ (kombinace únosnost nová 109)

Plastický moment únosnosti svorníku:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 300 \cdot 16^{2,6} = 121605,8 \text{ Nmm}^{-2}$$

Pevnost v otlačení rovnoběžně s vlákny:

$$f_{h,0,k} = 0,082(1 + 0,01d) \rho_k = 0,082(1 + 0,01 \cdot 16) \cdot 350 = 24,108 \text{ Nmm}^{-2}$$

Součinitel pro rostlé dřevo:

$$k_{90} = 1,35 + 0,015 \cdot d = 1,35 + 0,015 \cdot 16 = 1,59$$

Pevnost v otlačení kolmo k vláknům:

$$f_{h,90,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{24,108}{1,59 \cdot \sin^2 90 + \cos^2 90} = 15,162 \text{ Nmm}^{-2}$$

Charakteristická únosnost jednoho svorníku ve směru kolmém k vláknům:

Charakteristická únosnost jednoho svorníku na vytažení $F_{ax,Rk}$ byla uvažována rovna nule.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ \frac{f_{h,2,k} t_2 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_1}{t_2} + \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right\}$$

$$F_{v,Rk} = \left\{ \begin{array}{l} 24359,6 \\ 24359,6 \\ 10048,6 \\ 9723 \\ 9723 \\ 8833,5 \end{array} \right\} = 8833,5 \text{ N} = 8,8 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost jednoho svorníku:

$$F_{v,Rd} = \frac{k_{mod} F_{v,Rk}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \cdot 8,8}{1,3} = 6,12 \text{ kN}$$

Síla v krajním svorníku:

$$F_1 = F_{v,Rd} = 6,12 \text{ kN}$$

Síla v druhém svorníku:

$$F_2 = F_1 \frac{r_2}{r_1} = 6,12 \frac{0,3}{0,5} = 3,67 \text{ kN}$$

Ohybová únosnost:

$$M_{rd} = 2F_1 r_1 + 2F_2 r_2 = 2 \cdot 6,12 \cdot 0,5 + 2 \cdot 3,67 \cdot 0,3 = 8,32 \text{ kNm}$$

Podmínka:

$$M_{ed} < M_{Rd}$$

$$6,82 \text{ kNm} < 8,32 \text{ kNm}$$

Spoj vyhoví

Posouzení nejvíce zatíženého svorníku na vliv výslednice sil:

Posouzení kombinace zatížení s maximálním ohybem (kombinace únosnost nová 109):

Tahová síla: $N = 29,59 \text{ kN}$ na jeden svorník $N = 3,7 \text{ kN}$

Posouvající síla: $V = 0,11 \text{ kN}$ na jeden svorník $V = 0,01 \text{ kN}$

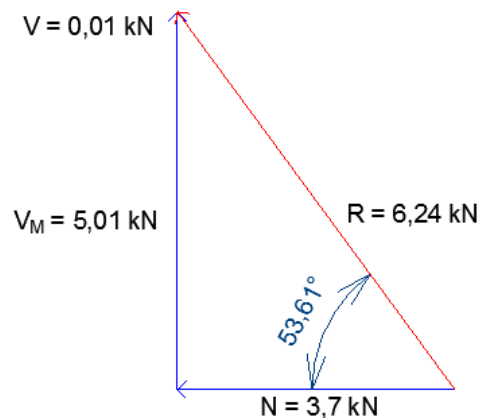
Ohybový moment: $M = 6,82 \text{ kNm}$

Posouvající síla od ohybového momentu na krajní svorník:

$$M_{ed} = 2V_{M,1}r_1 + 2V_{M,2}r_2$$
$$M_{ed} = 2V_{M,1}r_1 + 2V_{M,2}\frac{r_2}{r_1}r_2$$
$$V_{M,1} = \frac{M_{ed}}{2r_1 + 2\frac{r_2^2}{r_1}} = \frac{6,82}{2 \cdot 0,5 + 2\frac{0,3^2}{0,5}} = 5,01 \text{ kN}$$

Výslednice sil: $R = 6,44 \text{ kN}$

Úhel výslednice: $\alpha = 53,61^\circ$



Pevnost v otláčení ve směru výslednice sil:

$$f_{h,53,61,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{24,108}{1,59 \cdot \sin^2 53,61 + \cos^2 53,61} = 17,44 \text{ Nmm}^{-2}$$

Poměr pevností dřev:

$$\beta = 1$$

Posouzení na vliv výslednice sil:

Charakteristická únosnost jednoho svorníku ve směru výslednice sil:

Charakteristická únosnost jednoho svorníku na vytáhnutí $F_{ax,Rk}$ byla uvažována rovna nule.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k}t_1d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k}t_1d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}dt_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k}t_2d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}dt_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk}f_{h,1,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right\}$$

$$F_{v,Rk} = \begin{Bmatrix} 27904,2 \\ 27904,2 \\ 11558,3 \\ 11004,1 \\ 11004,1 \\ 9473,8 \end{Bmatrix} = 9473,8 \text{ N} = 9,47 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost svorníku:

$$F_{v,Rd} = \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \cdot 9,47}{1,3} = 6,56 \text{ kN}$$

Podmínka:

$$R_{ed} < F_{v,Rd}$$

$$6,24 \text{ kN} < 6,56 \text{ kN}$$

Spoj vyhoví

Tabulka č. 23: Minimální rozteče svorníků

rozteče a vzdálenosti od konců/okrajů	úhel	minimální rozteč nebo vzdálenost	α	Rozteč (mm)
a1 (rovnoběžně s vlákny)	$0 < \alpha < 360$	$(4 + \cos \alpha)d$	53,61	73,49
a2 (kolmo k vláknům)	$0 < \alpha < 360$	$4d$	53,61	64
a3,1 (zatížený konec)	$-90 < \alpha < 90$	$\max(7d; 80\text{mm})$	53,61	112
a3,2 (nezatížený konec)	$90 < \alpha < 150$	$\max(1 + 6\sin \alpha)d; 4d$	126,39	86,4
	$150 < \alpha < 210$	$4d$	-	-
	$210 < \alpha < 270$	$\max(2 + 2\sin \alpha)d; 4d$	-	-
a4,1 (zatížený okraj)	$0 < \alpha < 180$	$\max(2 + 2\sin \alpha)d; 3d$	53,61	57,76
a4,2 (nezatížený okraj)	$180 < \alpha < 360$	$3d$	306,39	48

Posouzení spojem oslabené části průřezu vazného trámu:

Rozměry oslabeného prvku ve spoji:

Šířka	$b_{ef} = 0,1 \text{ m}$
Výška	$h_{ef} = 0,24 - 2 \cdot \emptyset = 0,24 - 2 \cdot 0,016 = 0,208 \text{ m}$
Plocha	$A_{ef} = 0,0208 \text{ m}^2$
	$W = 0,00096 \text{ m}^3$

Návrhové síly:

Tahová síla:	$N_{ed} = 29,59 \text{ kN}$
Posouvající síla:	$V_{ed} = V + 2 \cdot V_M = 0,11 + 2 \cdot 5,01 = 10,13 \text{ kN}$
Ohybový moment:	$M_{ed} = 6,82 \text{ kNm}$

Posouzení ohybového momentu:

Napětí od ohybového momentu: $\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{6,82}{0,00096 \cdot 1000} = 7,10 \text{ MPa}$

Podmínka: $\sigma_{m,y,d} < f_{m,y,d}$

$$7,10 < 16,62$$

vyhoví

Posouzení na tahu:

Napětí od tahu: $\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{ed}}{A_{ef}} = \frac{29,59}{0,0208 \cdot 1000} = 1,42 \text{ MPa}$

Podmínka: $\sigma_{t,0,d} < f_{t,0,d}$

$$1,42 < 9,69$$

vyhoví

Posouzení na kombinaci tahu s ohybem:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_y f_{m,y,d}} < 1$$

$$\frac{1,42}{9,69} + \frac{7,10}{1 \cdot 16,62} < 1$$

$$0,57 < 1$$

vyhoví

Posouzení na smyk:

Napětí od tahu: $\tau_{v,d} = \frac{3 \cdot V_{ed}}{2 \cdot A_{ef}} = \frac{3 \cdot 10,13}{2 \cdot 0,0208 \cdot 1000} = 0,73 \text{ MPa}$

Podmínka: $\tau_{v,d} < f_{vd}$

$$0,73 < 1,86$$

vyhoví

Posouzení ve stavu s maximálním tahem (únosnost nová 110) :

Tahová síla: $N = 53,94 \text{ kN}$ na jeden svorník $N = 6,74 \text{ kN}$

Posouvající síla: $V = 2,27 \text{ kN}$ na jeden svorník $V = 0,28 \text{ kN}$

Ohybový moment: $M = 0,25 \text{ kNm}$

Posouvající síla od ohybového momentu na krajní svorník:

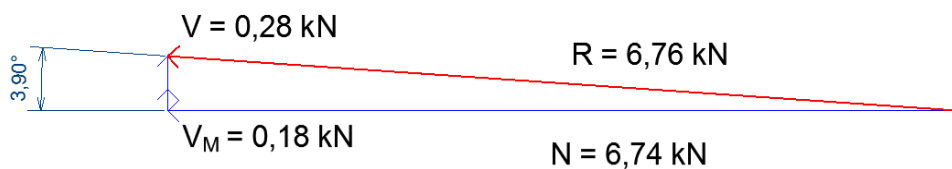
$$M_{ed} = 2V_{M,1}r_1 + 2V_{M,2}r_2$$

$$M_{ed} = 2V_{M,1}r_1 + 2V_{M,2}\frac{r_2}{r_1}r_2$$

$$V_{M,1} = \frac{M_{ed}}{2r_1 + 2\frac{r_2^2}{r_1}} = \frac{0,25}{2 \cdot 0,5 + 2\frac{0,3^2}{0,5}} = 0,18 \text{ kN}$$

Výslednice sil na jeden svorník: $R = 6,76 \text{ kN}$

Úhel výslednice: $\alpha = 3,9^\circ$



Pevnost v otlacení ve směru výslednice sil:

$$f_{h,3,9,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{24,108}{1,59 \cdot \sin^2 3,9 + \cos^2 3,9} = 24,04 \text{ Nmm}^{-2}$$

Poměr pevností dřev:

$$\beta = 1$$

Posouzení na vliv výslednice sil:

Charakteristická únosnost jednoho svorníku ve směru výslednice sil:

Charakteristická únosnost jednoho svorníku na vytažení $F_{ax,Rk}$ byla uvažována rovna nule.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right\}$$

$$F_{v,Rk} = \begin{Bmatrix} 38467,8 \\ 38467,8 \\ 15933,9 \\ 14711,7 \\ 14711,7 \\ 11122,4 \end{Bmatrix} = 11122,4 \text{ N} = 11,12 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost svorníku:

$$F_{v,Rd} = \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \cdot 11,12}{1,3} = 7,7 \text{ kN}$$

Podmínka:

$$R_{ed} < F_{v,Rd}$$

$$6,74 \text{ kN} < 7,7 \text{ kN}$$

Spoj vyhoví

Tabulka č. 24: Minimální rozteče svorníků

rozteče a vzdálenosti od konců/okrajů	úhel	minimální rozteč nebo vzdálenost	α	Rozteč [mm]
a1 (rovnoběžně s vlákny)	$0 < \alpha < 360$	$(4 + \cos \alpha) d$	3,9	79,97
a2 (kolmo k vláknům)	$0 < \alpha < 360$	$4d$	3,9	64
a3,1 (zatížený konec)	$-90 < \alpha < 90$	$\max(7d; 80\text{mm})$	3,9	112
a3,2 (nezatížený konec)	$90 < \alpha < 150$	$\max(1 + 6\sin \alpha) d; 4d$	-	-
	$150 < \alpha < 210$	$4d$	176,1	64
	$210 < \alpha < 270$	$\max(2 + 2\sin \alpha) d; 4d$	-	-
a4,1 (zatížený okraj)	$0 < \alpha < 180$	$\max(2 + 2\sin \alpha) d; 3d$	3,9	48,00
a4,2 (nezatížený okraj)	$180 < \alpha < 360$	$3d$	356,1	48

Posouzení spojem oslabené části průřezu vazného trámu:

Rozměry oslabeného prvku ve spoji:

Šířka	$b_{ef} = 0,1 \text{ m}$
Výška	$h_{ef} = 0,24 - 2 \cdot \emptyset = 0,24 - 2 \cdot 0,016 = 0,208 \text{ m}$
Plocha	$A_{ef} = 0,0208 \text{ m}^2$
	$W = 0,00096 \text{ m}^3$

Návrhové síly:

Tahová síla:	$N_{ed} = 53,94 \text{ kN}$
Posouvající síla:	$V_{ed} = V + 2 \cdot V_M = 2,27 + 2 \cdot 0,18 = 2,63 \text{ kN}$
Ohybový moment:	$M_{ed} = 0,25 \text{ kNm}$

Posouzení ohybového momentu:

Napětí od ohybového momentu:	$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{0,25}{0,00096 \cdot 1000} = 0,26 \text{ MPa}$
Podmínka:	$\sigma_{m,y,d} < f_{m,y,d}$
	$0,26 < 16,62$
	vyhoví

Posouzení na tahu:

Napětí od tahu:	$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{ed}}{A_{ef}} = \frac{53,94}{0,0208 \cdot 1000} = 2,59 \text{ MPa}$
Podmínka:	$\sigma_{t,0,d} < f_{t,0,d}$
	$2,59 < 9,69$
	vyhoví

Posouzení na kombinaci tahu s ohybem:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_y f_{m,y,d}} < 1$$
$$\frac{2,59}{9,69} + \frac{0,26}{1 \cdot 16,62} < 1$$
$$0,29 < 1$$

vyhoví

Posouzení na smyk:

Napětí od tahu:	$\tau_{v,d} = \frac{3 \cdot V_{ed}}{2 \cdot A_{ef}} = \frac{3 \cdot 2,63}{2 \cdot 0,0208 \cdot 1000} = 0,19 \text{ MPa}$
Podmínka:	$\tau_{v,d} < f_{vd}$
	$0,19 < 1,86$
	vyhoví

Posouzení ve stavu s maximální posouvající silou (únosnost nová 175):

Tahová síla: $N = 18,96 \text{ kN}$ na jeden svorník $N = 2,37 \text{ kN}$

Posouvající síla: $V = 4,18 \text{ kN}$ na jeden svorník $V = 0,52 \text{ kN}$

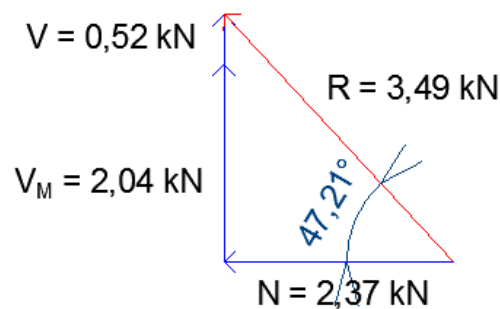
Ohybový moment: $M = 2,78 \text{ kNm}$

Posouvající síla od ohybového momentu na krajní svorník:

$$M_{ed} = 2V_{M,1}r_1 + 2V_{M,2}r_2$$

$$M_{ed} = 2V_{M,1}r_1 + 2V_{M,2}\frac{r_2}{r_1}r_2$$

$$V_{M,1} = \frac{M_{ed}}{2r_1 + 2\frac{r_2^2}{r_1}} = \frac{2,78}{2 \cdot 0,5 + 2\frac{0,3^2}{0,5}} = 2,04 \text{ kN}$$



Výslednice sil: $R = 3,49 \text{ kN}$

Úhel výslednice: $\alpha = 47,21^\circ$

Pevnost v otlačení ve směru výslednice sil:

$$f_{h,47,21,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{24,108}{1,59 \cdot \sin^2 47,21 + \cos^2 47,21} = 18,29 \text{ Nmm}^{-2}$$

Poměr pevností dřev:

$$\beta = 1$$

Posouzení na vliv výslednice sil:

Charakteristická únosnost jednoho svorníku ve směru výslednice sil:

Charakteristická únosnost jednoho svorníku na vytážení $F_{ax,Rk}$ byla uvažována rovna nule.

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{h,1,k}t_1d}{1+\beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k}t_1d}{2+\beta} \left[\sqrt{2\beta(1+\beta) + \frac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}dt_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k}t_2d}{1+2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta) + \frac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}dt_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1+\beta}} \sqrt{2M_{y,Rk}f_{h,1,k}d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right\}$$

$$F_{v,Rk} = \begin{Bmatrix} 29272,1 \\ 29272,1 \\ 12124,9 \\ 11484,6 \\ 11484,6 \\ 9703,2 \end{Bmatrix} = 9703,2 \text{ N} = 9,7 \text{ kN}$$

Návrhová únosnost svorníku:

$$F_{v,Rd} = \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \cdot 9,7}{1,3} = 6,72 \text{ kN}$$

Podmínka:

$$R_{ed} < F_{v,Rd}$$

$$3,49 \text{ kN} < 6,72 \text{ kN}$$

Spoj vyhoví

Tabulka č. 25: Minimální rozteče svorníků

rozteče a vzdálenosti od konců/okrajů	úhel	minimální rozteč nebo vzdálenost	α	Rozteč [mm]
a1 (rovnoběžně s vlákny)	$0 < \alpha < 360$	$(4 + \cos \alpha)d$	47,21	74,87
a2 (kolmo k vláknům)	$0 < \alpha < 360$	4d	47,21	64
a3,1 (zatížený konec)	$-90 < \alpha < 90$	$\max(7d; 80\text{mm})$	47,21	112
a3,2 (nezatížený konec)	$90 < \alpha < 150$	$\max(1 + 6\sin \alpha)d; 4d$	132,79	86,44
	$150 < \alpha < 210$	4d	-	-
	$210 < \alpha < 270$	$\max(2 + 2\sin \alpha)d; 4d$	-	-
a4,1 (zatížený okraj)	$0 < \alpha < 180$	$\max(2 + 2\sin \alpha)d; 3d$	47,21	55,48
a4,2 (nezatížený okraj)	$180 < \alpha < 360$	3d	312,79	48

Posouzení spojem oslabené části průřezu vazného trámu:

Rozměry oslabeného prvku ve spoji:

Šířka	$b_{ef} = 0,1 \text{ m}$
Výška	$h_{ef} = 0,24 - 2 \cdot \emptyset = 0,24 - 2 \cdot 0,016 = 0,208 \text{ m}$
Plocha	$A_{ef} = 0,0208 \text{ m}^2$
	$W = 0,00096 \text{ m}^3$

Návrhové síly:

Tahová síla:	$N_{ed} = 18,96 \text{ kN}$
Posouvající síla:	$V_{ed} = V + 2 \cdot V_M = 4,18 + 2 \cdot 2,04 = 8,26 \text{ kN}$
Ohybový moment:	$M_{ed} = 2,78 \text{ kNm}$

Posouzení ohybového momentu:

Napětí od ohybového momentu: $\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} = \frac{2,78}{0,00096 \cdot 1000} = 2,90 \text{ MPa}$

Podmínka: $\sigma_{m,y,d} < f_{m,y,d}$

$$2,9 < 16,62$$

vyhoví

Posouzení na tahu:

Napětí od tahu: $\sigma_{t,0,d} = \frac{N_{ed}}{A_{ef}} = \frac{18,96}{0,0208 \cdot 1000} = 0,91 \text{ MPa}$

Podmínka: $\sigma_{t,0,d} < f_{t,0,d}$

$$0,91 < 9,69$$

vyhoví

Posouzení na kombinaci tahu s ohybem:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_y f_{m,y,d}} < 1$$

$$\frac{0,91}{9,69} + \frac{2,9}{1 \cdot 16,62} < 1$$

$$0,27 < 1$$

vyhoví

Posouzení na smyk:

Napětí od tahu: $\tau_{v,d} = \frac{3 \cdot V_{ed}}{2 \cdot A_{ef}} = \frac{3 \cdot 8,26}{2 \cdot 0,0208 \cdot 1000} = 0,60 \text{ MPa}$

Podmínka: $\tau_{v,d} < f_{vd}$

$$0,60 < 1,86$$

vyhoví

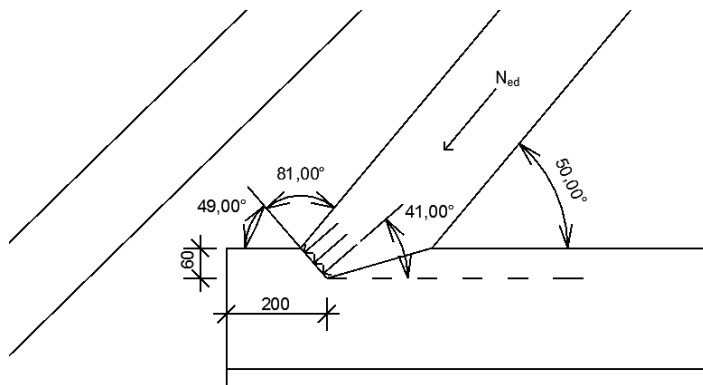
Výsledky posouzení vybraných svorníkových spojů:

Tabulka č. 26: Výsledky posouzení vybraných svorníkových spojů

Posouzení únosnosti vybraných svorníkových spojů				
název prvku		kombinace zatížení	posouzení	
spoj protězy a nepoškozené části vazného trámu presbytáře	ohybová únosnost	únosnost presbytář 93	3 kNm < 4,89 kNm	vyhoví
	únosnost ve směru výslednice sil			
	kombinace zatížení s $M_{y\max}$	únosnost presbytář 93	4,99 kN < 6,12 kN	vyhoví
	kombinace zatížení s $N_{t,\max}$	únosnost presbytář 97	2,25 kN < 6,66 kN	vyhoví
	kombinace zatížení s V_{\max}	únosnost presbytář 148	5,01 kN < 6,12 kN	vyhoví
spoj protězy a nepoškozené části krokve hlavní lodi	ohybová únosnost	únosnost nová 107	1,54 kNm < 2,02 kNm	vyhoví
	únosnost ve směru výslednice sil			
	kombinace zatížení s $M_{y\max}$	únosnost nová 107	4,94 kN < 6,12 kN	vyhoví
	kombinace zatížení s $N_{t,\max}$	únosnost nová 124	2,85 kN < 7,48 kN	vyhoví
	kombinace zatížení s V_{\max}	únosnost nová 94	3,09 kN < 6,12 kN	vyhoví
spoj protězy a nepoškozené části krokve Kaple andělů	ohybová únosnost	únosnost nová 143	1,47 kNm < 1,95 kNm	vyhoví
	únosnost ve směru výslednice sil			
	kombinace zatížení s $M_{y\max}$	únosnost nová 143	5,17 kN < 5,66 kN	vyhoví
	kombinace zatížení s $N_{t,\max}$	únosnost nová 112	5,21 kN < 6,22 kN	vyhoví
	kombinace zatížení s V_{\max}	únosnost nová 110	3,08 kN < 4,88 kN	vyhoví

13.2 Tesařské spoje

Posouzení únosnost čelního zapuštění nové části krokve do vazného trámu hlavní lodi:



Obrázek č. 39: Detail zapuštění krokve do vazného trámu hlavní lodi

Rozměry krokve:

Šířka $b = 0,18 \text{ m}$

Výška $h = 0,2 \text{ m}$

Rozměry pozednice:

Šířka $b = 0,2 \text{ m}$

Výška $h = 0,24 \text{ m}$

Hloubka zapuštění $t_v = 0,06 \text{ m}$

Délka ke konci trámu $l_v = 0,2 \text{ m}$

Sklon návrhové síly ke směru vláken $\alpha = 41^\circ$

Sklon krokve $\beta = 50^\circ$

Návrhová pevnost v tlaku kolmo k vláknům

$$f_{c,90d} = 1,73 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny

$$f_{c,0d} = 14,54 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost v tlaku šikmo k vláknům

$$f_{c,41d} = \frac{f_{c,0d}}{\frac{f_{c,0d}}{k_{c,90} f_{c,90d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{14,54}{\frac{14,54}{1 \cdot 1,73} \sin^2 41 + \cos^2 41} = 3,47 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost ve smyku

$$f_{v,d} = 1,86 \text{ Mpa}$$

Návrhová síla:

$$N_{ed} = 63,42 \text{ kN}$$

Napětí od tlaku šikmo k vláknům:

$$\sigma_{c,41,d} = \frac{N_{ed} \cos^2 \alpha}{b \cdot t_v} = \frac{63,42 \cdot \cos^2 41}{0,18 \cdot 0,06} = 3,34 \text{ MPa}$$

Podmínka:

$$\sigma_{c,41,d} < f_{c,41d}$$

$$3,34 \text{ MPa} < 3,47 \text{ MPa}$$

Spoj vyhoví

Napětí od smyku:

$$\tau_{v,d} = \frac{N_{ed} \cos \alpha}{b \cdot l_v} = \frac{63,42 \cdot \cos 41}{0,18 \cdot 0,2} = 1,13 \text{ MPa}$$

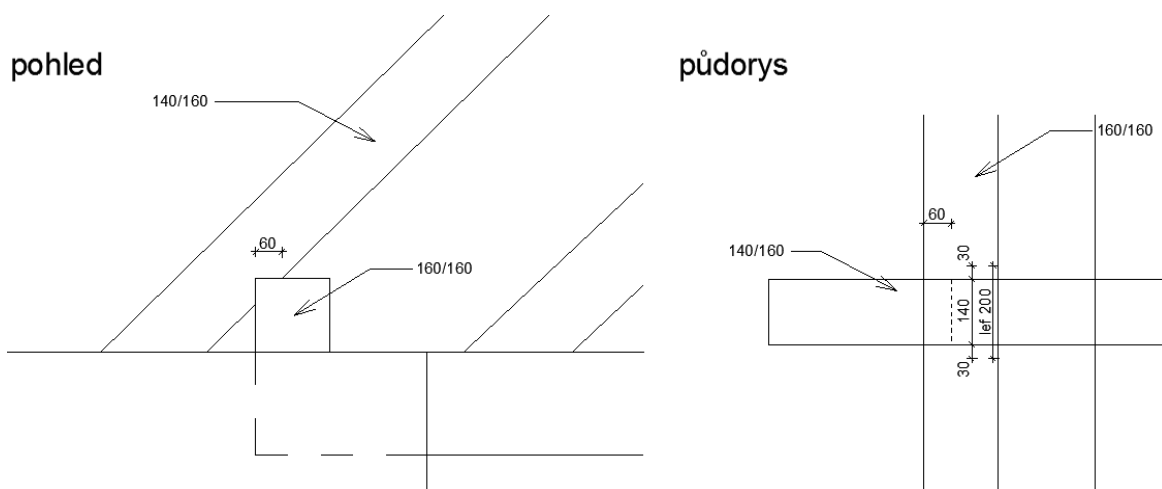
Podmínka:

$$\tau_{v,d} < f_{v,d}$$

$$1,13 \text{ MPa} < 1,86 \text{ MPa}$$

Spoj vyhoví

Posouzení únosnosti osedlání nové části krokve Kaple andělů na pozednici:



Obrázek č. 40: Detail osedlání krokve na pozednici

Rozměry krokve:

Šířka $b_k = 0,14 \text{ m}$

Výška $h_k = 0,16 \text{ m}$

Rozměry pozednice:

Šířka $b_p = 0,16 \text{ m}$

Výška $h_p = 0,16 \text{ m}$

Délka osedlání $b_{ef} = 0,06 \text{ m}$

Sklon krokve $\alpha = 45^\circ$

Návrhové síly (únosnost nová 177):

Normálová síla – tlak $N_{ed} = 30,7 \text{ kN}$

Posouvající síla $V_{ed} = 1,49 \text{ kN}$

Výslednice sil
$$R_{ed} = \sin 45 \cdot N_{ed} + \sin 45 \cdot V_{ed} =$$
$$= \sin 45 \cdot 30,7 + \sin 45 \cdot 1,49 = 22,76 \text{ kN}$$

Posouzení tlaku kolmo k vláknům na pozednici:

$$k_{\text{mod}} \quad 0,9$$

$$\gamma_M \quad 1,3$$

Charakteristická pevnost v tlaku kolmo k vláknům

$$f_{c,90k} = 2,5 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost v tlaku kolmo k vláknům

$$f_{c,90d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{c,90k}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \cdot 2,5}{1,3} = 1,73 \text{ MPa}$$

$$k_{c,90} \quad 1,25$$

$$\text{Efektivní délka} \quad l_{ef} = b_k + 2 \cdot 0,03 = 0,14 + 2 \cdot 0,03 = 0,2 \text{ m}$$

$$\text{Otlačovaná plocha} \quad A_{ef,p} = l_{ef} \cdot b_{ef} = 0,2 \cdot 0,06 = 0,012 \text{ m}^2$$

Napětí v tlaku kolmo k vláknům

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{R_{ed}}{A_{ef,p}} = \frac{22,76}{0,012 \cdot 1000} = 1,9 \text{ MPa}$$

$$\text{Podmínka:} \quad \sigma_{c,90,d} < f_{c,90d} \cdot k_{c,90}$$

$$1,9 < 1,73 \cdot 1,25$$

$$1,9 \text{ MPa} < 2,16 \text{ MPa}$$

Spoj vyhoví

Posouzení krokve na tlak šikmo k vláknům:

$$k_{\text{mod}} \quad 0,9$$

$$\gamma_M \quad 1,3$$

Návrhová pevnost v tlaku kolmo k vláknům

$$f_{c,90d} = 1,73 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny

$$f_{c,0d} = 14,54 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost v tlaku šikmo k vláknům

$$f_{c,45d} = \frac{f_{c,0d}}{\frac{f_{c,0d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{14,54}{\frac{14,54}{1 \cdot 1,73} \sin^2 45 + \cos^2 45} = 3,09 \text{ MPa}$$

$$\text{Efektivní délka} \quad b_k = 0,14 \text{ m}$$

$$\text{Otláčovaná plocha} \quad A_{ef,k} = b_k \cdot b_{ef} = 0,14 \cdot 0,06 = 0,0084 \text{ m}^2$$

Napětí v tlaku šikmo k vláknům

$$\sigma_{c,45,d} = \frac{R_{ed}}{A_{ef,p}} = \frac{22,76}{0,0084 \cdot 1000} = 2,71 \text{ MPa}$$

$$\text{Podmínka:} \quad \sigma_{c,45,d} < f_{c,45d}$$

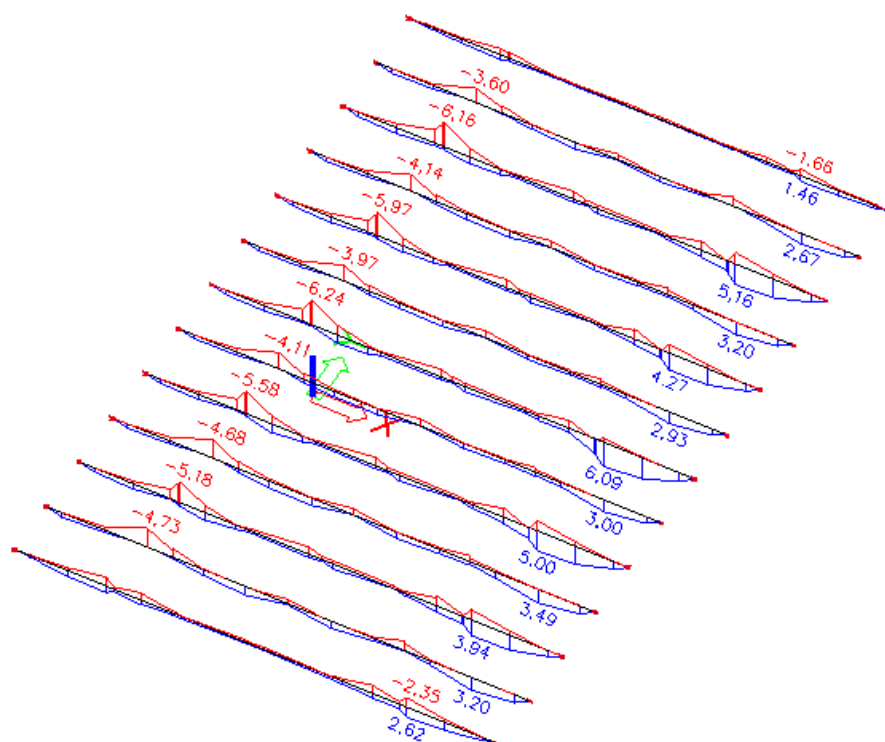
$$2,71 \text{ MPa} < 3,09 \text{ MPa}$$

Spoj vyhoví

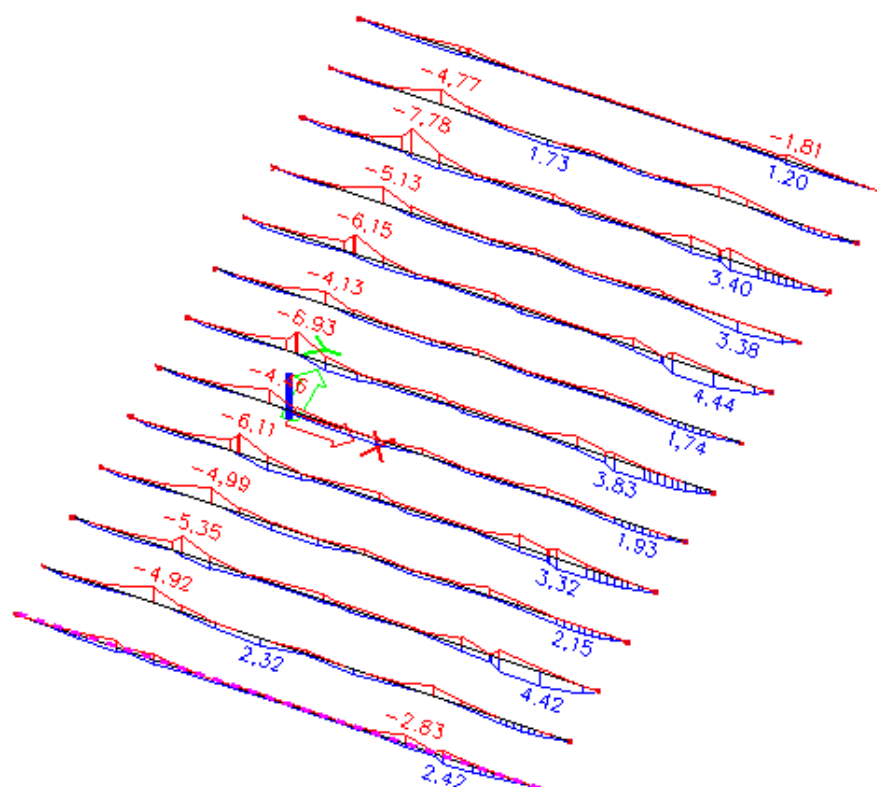
14. Model poškozené konstrukce

Z modelu s poškozenými částmi vyplývá, že došlo k redistribuci vnitřních sil. Zdravé prvky přebírají větší část zatížení. Pro demonstraci byl vybrán příklad vazných trámů hlavní lodi. Na obrázcích 41 (nepoškozená konstrukce) a 42 (poškozená konstrukce) je možno vidět srovnání průběhů ohybových momentů k ose y . Maximální navýšení činí 1,62 kNm což je nárůst o 26%. Vzhledem k velkému předimenzování prvků konstrukce nezpůsobí ani toto zvýšení vnitřních sil ztrátu únosnost. O faktu, že poškozené části zatím nemají velký vliv na únosnost konstrukce, svědčí i to, že konstrukce stále stojí a neprojevují se ani zvýšené deformace střešních ploch.

U ostatních prvků je nárůst vnitřních sil na obdobné úrovni jako u popsaných vazných trámů. Z výpočtu vyplývá, že v současnosti nehrozí bezprostřední zřícení konstrukce krovu. Pokud by biodegradace nosných prvků krovu dále pokračovala, nelze ze současně známých informací bezpečně odhadnout, kdy by ke kolapsu mohlo dojít.



Obrázek č. 41: Průběh ohybových momentů k ose y na nepoškozené konstrukci



Obrázek č. 42: Průběh ohybových momentů k ose y na poškozené konstrukci

15. Závěr

V této práci byla ověřena únosnost vybraných prvků krovu s uvážením přetížení od nové břidlicové krytiny. I se zvýšeným zatížením vykazují vybrané posuzované prvky značné předimenzování. Při posuzování bylo uvažováno, že jsou vybrané prvky nepoškozené. V průběhu vypracovávání této diplomové práce byly kontrolovány deformace posuzovaných prvků. Díky předimenzování posuzovaných prvků vycházejí jejich průhyby výrazně nižší než limitní hodnoty, které jsou dány současně platnou normou. Vzhledem k charakteru skládané břidlicové krytiny, jejíž funkce není náchylná na deformace nosné konstrukce a faktu, že prvky krovu kostela netvoří viditelný podhled a krov není ani běžně přístupný, nebylo nutné mezní stav použitelnosti podrobněji posuzovat.

V druhé části práce byla navržena sanace v současnosti poškozených prvků. Většina prvků je poškozena pouze lokálně a proto byla zvolena metoda sanace protézování pomocí obdobného materiálu (jehličnatého řeziva). Protézy prvků byly k jejich nepoškozeným částem propojeny pomocí překlátování zajištěného svorníky. U vybraných spojů byla posouzena jejich únosnost. Prvky, které byly poškozeny ve větším rozsahu (více jak čtvrtina délky), budou při sanaci vyměněny celé.

Z porovnání vnitřních sil získaných z modelu poškozené konstrukce se stejně zatíženého modelu konstrukce nepoškozené je zřejmé, že nedochází k výrazně většímu přetížení nepoškozených prvků. Je proto možno říci, že v současné době nehrozí kolaps konstrukce. Sanace poškozených prvků kostela je však nutná. Z informací, které v současné době jsou k dispozici, není možno s jistotou předpovědět, za jak dlouho by ke ztrátě únosnosti konstrukce vlivem biodegradace mohlo dojít. Je však zřejmé, že degradace poškozených prvků krovu stále pokračuje. Proto je nutné provést sanaci krovu kostela v co nejbližším termínu.

Kostel sv. Jana Křtitele slouží svému účelu již staletí a díky rekonstrukci jeho krovu a výměně krytiny může být využíván i nadále.

16. Seznam norem

- [1] ČSN EN 1991-1-3, Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – část 1-1: Obecná zatížení
- [2] ČSN EN 1991-1-3, Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – část 1-3: Obecná zatížení – Zatížení sněhem
- [3] ČSN EN 1991-1-4, Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem
- [4] ČSN EN 1995-1-1, Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – část 1-1: obecná pravidla – společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby

17. Seznam literatury

- [5] Prokop F. *Konstrukce hlavní lodi farního kostela sv. Jana Křtitele v Hlučíně*
- [6] Pirner M. Fischer O., *Zatížení staveb větrem*
- [7] Vaniř J., a kolektiv., *Historické krovy II průzkumy a opravy*
- [8] Koželuh B., *STEP 1 – dřevěné konstrukce podle eurokódu 5*

18. Prezentace k přednáškám

- [9] Antonín L., *Dřevěné konstrukce – Přednáška č. 2*
- [10] Antonín L., *Dřevěné konstrukce – Přednáška č. 3*
- [11] Antonín L., *Dřevěné konstrukce II – Sanace dřevěných konstrukcí*

19. Internetové zdroje

- [12] www.marvan.cz
- [13] www.svp-stavebni.cz